

Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra materiálového inženýrství



Stanovení součinitele tření a analýza frikčního povrchu
kovo-keramických brzdových desek

Determination of the friction coefficient and the analysis of frictional
surface of metal-ceramic brake pads

Autor: Bc. Lukáš Sojka

2017

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Vaculík, Ph.D.

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Lukáš Sojka**

Studijní program: N3923 Materiálové inženýrství

Studijní obor: 3911T036 Progresivní technické materiály

Téma: Stanovení součinitele tření a analýza frikčního povrchu kovo-keramických brzdových desek
Determination of the friction coefficient and the analysis of frictional surface of metal-ceramic brake pads

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Literární rešerše zadané problematiky – příprava, vlastnosti, aplikace a testování frikční účinnosti třecích kovo-keramických materiálů.

Experimentální část:

2. Povrchová a objemová analýza vzorků frikčních kompozitů ve výchozím stavu (struktura, fázového složení)
3. Testování vzorků brzdových desek pomocí brzdového dynamometru Link M2800
4. Stanovení ořezu a dynamického součinitele tření brzdových desek
5. Charakterizace fází, vznikajících na povrchu brzdových desek následkem tření

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] HARPER, G. A. Brakes and Friction Materials: The History and Development of the Technologies. Professional Engineering Publishing, 1997, 1st ed., 80 p. ISBN 1860581277.
- [2] DANTE, R. C. Handbook of Friction Materials and Their Applications. Woodhead Publishing, 2015, 1st ed., 174 p. ISBN 0081006195.
- [3] SUNDARKRISHNAA, K. L. Friction Material Composites: Materials Perspective. Springer-Verlag GmbH, 2012, 1st ed., 333 p. ISBN 3-642-33450-4.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Miroslav Vaculík, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2016

Datum odevzdání: 10.05.2017

prof. Ing. Vlastimil Vodárek, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování diplomové práce

I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání diplomové práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah DP |
| 2. Originál zadání DP | 7. Textová část DP |
| 3. Zásady pro vypracování DP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníky a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm, zarovnání do bloku. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9). Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách).

U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690. Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní DP také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení DP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem navazujícího magisterského studia Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2016/2017.

Ostrava 2. 12. 2016



Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě 10.5.2017

..... Lukáš Lajtha
podpis (jméno a příjmení studenta)

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat všem pracovníkům VŠB-TUO, kteří mi pomáhali s měřeními. Dále bych chtěl poděkovat svým blízkým, kteří mě při práci a studiu podporovali. V neposlední řadě chci poděkovat vedoucímu práce, Ing. Miroslavu Vaculíkovi, Ph.D. za všechny připomínky a rady.

Tato diplomová práce vznikla při řešení projektu č. **LO1203** „Regionální materiálově technologické výzkumné centrum - program udržitelnosti“ financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky a dále za přispění projektů Studentské grantové soutěže **SP2017/60** „Rozvoj experimentálních metod charakterizace struktury a vlastností technických materiálů“ a **SP2017/58** „Specifický výzkum v metalurgickém, materiálovém a procesním inženýrství“.

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na stanovení dynamického součinitele tření kovo-keramických brzdových desek a na analýzu jejich frikčního povrchu. Jsou zde srovnány vlastnosti brzdového obložení před brzděním a po brzdění, provozování desek je simulováno na brzdovém dynamometru. Sledovanými vlastnostmi jsou kromě součinitele tření i opotřebení desek, studován je jejich otěr a změny povrchu. Zkoumány jsou celkem tři různé vzorky, z toho dva kovo-keramické a jeden komerční semi-metalický pro srovnání. Změny ve složení i struktuře frikčního povrchu jsou studovány pomocí několika analytických metod. Strukturní vlastnosti jsou popsány pomocí optické i elektronové mikroskopie, složení zkoumaných vzorků bylo analyzováno pomocí energiově disperzní spektroskopie, rentgenové fluorescenční spektroskopie a Ramanovy spektroskopie.

Klíčová slova

Kovo-keramické kompozity, brzdový dynamometr, dynamický součinitel tření, SEM-EDX, XRFS, Raman.

Abstract

This diploma thesis is focused on determination of dynamic friction coefficient of metal-ceramic brake pads and on analysis of their frictional surface. Properties of brake linings before and after braking are compared, while their usage is simulated on a brake dynamometer. Among the studied parameters, besides friction coefficient, are wear characteristics. Abrasion particles and changes in surface are determined as well. Three different samples are studied, two of them metal-ceramic and one commercial semi-metallic for comparison. Changes in composition and structure of the frictional surface are studied with several analytic methods. Structural properties are described using both optical and electron microscopy, the composition of studied samples was analyzed using energy-dispersive X-ray spectroscopy, X-ray fluorescence spectroscopy and Raman spectroscopy.

Keywords

Metal-ceramic composites, brake dynamometer, dynamic friction coefficient, SEM-EDX, XRFS, Raman.

Obsah

Úvod	1
1. Tribologie	2
1.1. Mechanismy opotřebení	6
1.1.1. Abraze	6
1.1.2. Adheze	6
1.1.3. Chemické opotřebení	8
1.1.4. Delaminace neboli únava	8
1.2. Frikční vrstva	9
1.3. Vlastnosti třecích materiálů	11
2. Frikční kompozity	14
2.1. Základní rozdělení frikčních kompozitů	14
2.2. Materiály pro výrobu frikčních kompozitů	14
2.2.1. Modifikátory tření	15
2.2.2. Plniva	15
2.2.3. Vláknité materiály	16
2.2.4. Pojiva	16
2.3. Kovové a kovo-keramické frikční kompozity	16
2.3.1. Kompozity na bázi mědi	16
2.3.2. Kompozity na bázi železa	18
2.3.3. Kompozity s vysokým podílem nekovů	18
2.3.4. Výroba kovo-keramických frikčních kompozitů	18
2.4. Organické frikční kompozity	19
2.4.1. Modifikátory tření v organických kompozitech	19
2.4.2. Plniva v organických kompozitech	20
2.4.3. Vláknité materiály v organických kompozitech	20
2.4.4. Pojiva v organických kompozitech	21
2.4.5. Výroba organických frikčních kompozitů	22
2.5. Kompozity uhlík-uhlík	23

3.	Testování frikční účinnosti	24
3.1.	Sub-scale testery	24
3.1.1.	Pin-on-disc tester.....	24
3.1.2.	Chase tester	25
3.1.3.	FAST tester	25
3.2.	Full-scale testery	26
3.2.1.	Krauss tester	26
3.2.2.	Brzdový dynamometr.....	27
4.	Metody strukturní a fázové analýzy.....	29
4.1.	Optická mikroskopie.....	29
4.2.	SEM-EDX.....	29
4.3.	XRFS.....	30
4.4.	Ramanova spektroskopie	30
5.	Experimentální část	31
5.1.	Vzorky.....	31
5.2.	Dynamometrické zkoušky	33
5.2.1.	Postup testování	34
5.2.2.	Příprava měření	36
5.2.3.	Výsledky dynamometrických zkoušek	37
5.2.4.	Zhodnocení dynamometrických zkoušek.....	44
5.3.	Strukturní a fázová analýza.....	45
5.3.1.	Optická mikroskopie	45
5.3.2.	SEM-EDX analýza.....	47
5.3.3.	Analýza XRFS	59
5.3.4.	Ramanova spektroskopie	60
5.3.5.	Zhodnocení analýz	61
	Závěr.....	63
	Literární zdroje	64

Úvod

Cílem této bakalářské práce je vzájemné porovnání dvou různých kovo-keramických frikčních kompozitů a následné srovnání s komerčním typem semi-metalických organických brzdových desek. U dodaných vzorků kovo-keramických kompozitů, vyrobených ve společnosti Diafrikt Components s.r.o. v Potštejně, se jedná o materiály používané v průmyslových aplikacích, například v brzdových systémech jeřábových strojů a větrných elektráren. Hlavními zkoumanými charakteristikami jsou frikční účinnost a změny ve struktuře i složení frikčního povrchu jednotlivých vzorků, které nastanou po brzdění, vzhledem k výchozímu stavu.

Frikční účinnost se stanovuje na brzdovém dynamometru, sledovaným parametrem je dynamický součinitel tření. Z doprovodných měření je možné odhadnout také opotřebení, které je důležitým ukazatelem pro dlouhodobé užívání těchto materiálů. Struktura materiálů byla studována optickým i elektronovým mikroskopem, jejich složení pak spektroskopickými metodami, konkrétně šlo o energiově disperzní spektroskopii, rentgenovou fluorescenční spektroskopii a Ramanovu spektroskopii.

Studované brzdové desky byly podrobeny jednotlivým analýzám před měřením frikční účinnosti na brzdovém dynamometru a po tomto měření. Získali jsme tak informaci o tom, co se s materiálem těchto desek stane po určité době provozu, kterou dynamometrické testy simulují. Kromě samotných brzdových desek byly zkoumány rovněž otěrové částice vzniklé brzděním. Veškeré nashromážděné výsledky jsou shrnuty v praktické části této práce.

1. Tribologie

Tribologie je vědní obor o interakci povrchů, které se vůči sobě pohybují. Pojednává o problematice tření, opotřebení a mazání. Tření představuje sílu, která brání vzájemnému pohybu dvou povrchů, jež na sebe působí. Úbytek materiálu, který je důsledkem tohoto vzájemného pohybu, nazýváme opotřebením. Mazání má za cíl snížit tření a redukovat opotřebení [1].

Je to odvětví multidisciplinární, studující aspekty vzájemného působení, jak z hlediska fyzikálního, chemického, mechanického, technického tak i technologického. Můžeme tak hovořit o tribofyzice, tribochemii, tribomechanice, tribotechnice i tribotechnologii [2].

Tření

Třecími silami rozumíme síly působící v tečné rovině společné dotýkajícím se tělesům. Tyto síly vzájemnému pohybu těles brání nebo jej omezují. Podle klasických Amontonsových zákonů je třecí síla nezávislá na plošném obsahu zdánlivé stykové plochy. Je však úměrná normálové síle, kterou jsou obě tělesa k sobě přitlačována. Podle nových poznatků je však třecí síla úměrná plošnému obsahu skutečné – mikroskopické – třecí plochy, tedy aktuálnímu nosnému podílu. V praxi je tření nežádoucím jevem například v případě ložisek a převodovek, naopak nezbytné je u spojek a brzdových systémů, jimiž se budeme zabývat [1, 2].

Nosný podíl

Nosný podíl, značíme jej t_p , je tvarovou charakteristikou profilu povrchu. Definujeme jej jako poměr nosné délky profilu k délce základní, jak lze vidět v rovnici 1:

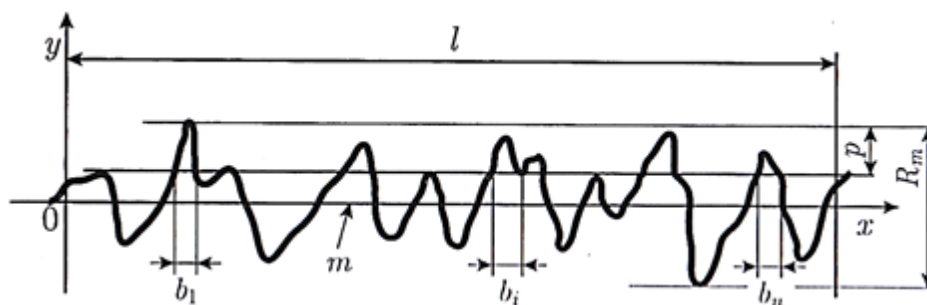
$$t_p = \frac{l_p}{l} \quad (1)$$

kde	t_p	je	nosný podíl (1),
	l_p	-	nosná délka profilu (m),
	l	-	základní délka (m).

Nosná délka profilu představuje součet délek úseků vytvořených na řezu v hloubce p pod čarou nejvyšších výstupků profilu, jak je znázorněno na obrázku níže a vyjádřeno rovnicí 2:

$$l_p = \sum_{i=1}^n b_i \quad (2)$$

kde b_i je délka úseku na řezu v hloubce p (m).

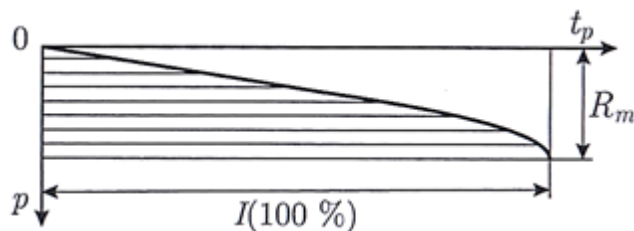


Obr. 1. Nosný podíl [1].

kde m je střední čára,
 R_m - největší výška nerovností profilu (m).

Závislost nosného podílu na hloubce p pod čarou výstupků profilu můžeme znázornit Abbotovou křivkou, viz obrázek níže a rovnice 3 [1].

$$t_p = t_p(p) \quad (3)$$

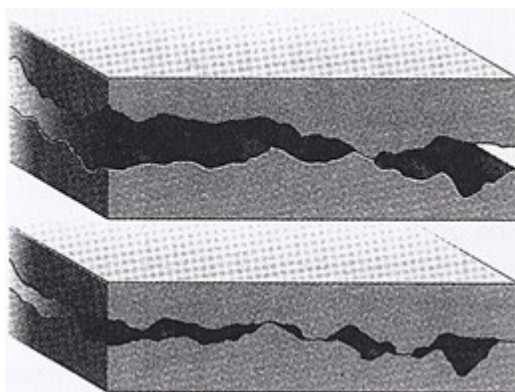


Obr. 2. Abbotova křivka [1].

Kontaktní oblasti

Jsou to místa, kde dochází ke tření mezi dvěma stýkajícími se nerovnými povrchy. Jestliže kolmá (přítlačná) tlaková síla roste, plocha kontaktu se rovněž zvětšuje. Velikost tření je

způsobena tím, jak rychle se zvětšuje plocha kontaktu, když roste přítláčná síla (Obr. 3). A není tedy určována nerovností kontaktní plochy [1].

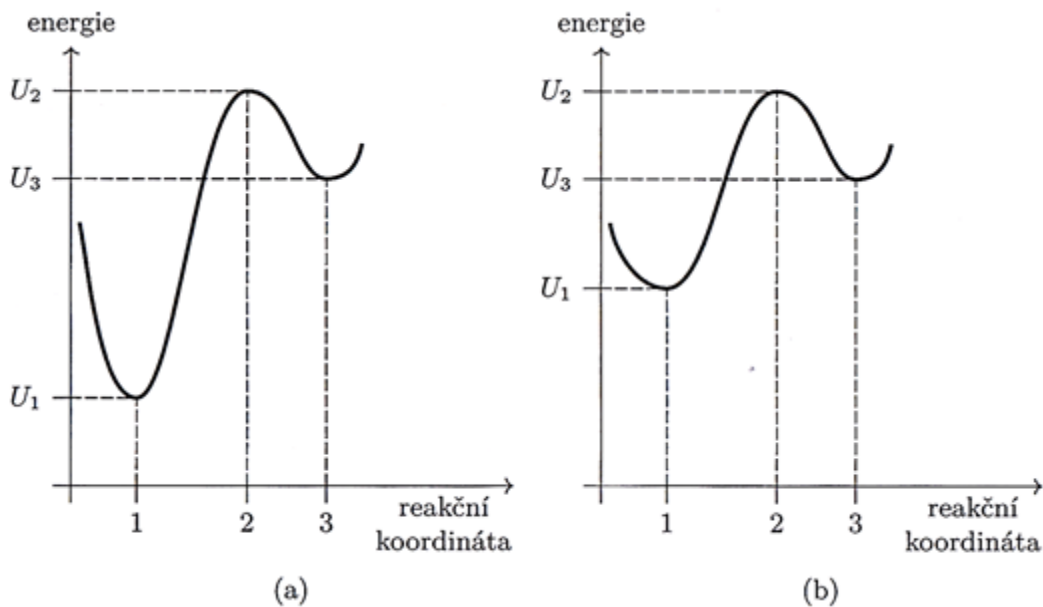


Obr. 3. Kontaktní oblasti [1].

Záchyt třecích ploch

Pro velikost tření je určující to, jak snadno se třecí plochy dvou těles zachytí a jak snadno se následně opět uvolní. Velikost tření je tedy určováno nevratností záchytu třecích ploch, viz obr. 4. Třením vybuzené kmity atomů v tělesech rezonují s jejich vlastními frekvencemi. Tyto akustické vlny (fonony) spotřebovávají mechanickou energii v závislosti na tom, jaké frekvence se vybudí. Zároveň je velikost tření závislá i na rychlosti vzájemného pohybu těles, jak se prokázalo měřením na křemenných mikrovahách. S rostoucí vzájemnou rychlostí tření roste, dokud se však nezačne materiál natavovat. Takovýto natavený materiál může sloužit jako mazivo a tření pak klesá [1, 2].

Na obrázku 4 je znázorněna nevratnost záchytu jakožto podíl rozdílů energie aktivovaného komplexu (reakční koordináta 2) a energie zachycení (reakční koordináta 1), respektive uvolnění (reakční koordináta 3) ploch. Tato nevratnost je v případě velkého tření (a) výrazně větší než při malém tření (b) [1].



Obr. 4. Nevratnost záchytu [1].

Tento vztah lze vyjádřit zlomkem viz níže:

$$N_z = \frac{(U_2 - U_1)}{(U_2 - U_3)} \quad (4)$$

kde N_z je nevratnost záchytu (1),
 U_1 - energie záchytu třecích ploch (J),
 U_2 - energie aktivovaného komplexu (J),
 U_3 - energie uvolnění třecích ploch (J).

Mazání

Tření a jím způsobené opotřebení je možné snížit mazáním. Mazání umožňuje rozptýlit energii tření a opotřebení třecích ploch do maziva. Mazivo musí splňovat určité základní podmínky a mívá také několik funkcí zároveň. Předně musí mazivo dobře smáčet povrchy těles a přenášet působící zatížení, nesmí však mít moc velké vnitřní tření a dále nesmí poškozovat kluzné povrchy. Mezi hlavní funkce maziv patří tlumení chvění, odvod tepla, zachycování nečistot a produktů opotřebení a také ochrana před korozi. Mazivem nemusí být jen látky kapalné, ale také pevné (nejčastěji grafit), či plynné [1, 3].

1.1. Mechanismy opotřebení

Běžně se rozlišují čtyři základní mechanismy opotřebení, které si popíšeme níže. Opotřebení představuje postupnou ztrátu materiálu v důsledku tření těles [1, 4].

1.1.1. Abraze

Abrazí nazýváme proces, při kterém tvrdá částice či tvrdý výstupek vyrývá rýhu v protějším měkčím povrchu. Vryp se liší v závislosti na tvaru a úhlu sklopení hran daného indentoru (výstupku či částice). Samotný mechanismus abraze se projevuje ve dvou základních podobách: „plužení“ (z *angl. plowing*), kdy se materiál v důsledku pohybu indentoru plasticky deformuje a odhrnuje stranou a „řezání“ (z *angl. cutting*), kdy dochází ke vzniku odštěpků, či třísek a pásků. Jak je zřejmé, v případě plužení obvykle nedochází k uvolnění částic z povrchu, naopak v případě řezání se částice či pásky materiálu uvolňují. To, jestli vzniknou odštěpky, či pásky, záleží zejména na kujnosti daného materiálu [4].

Při návrhu frikčního kompozitu je důležité dosáhnout rovnováhy tak, aby nedocházelo k nadměrnému opotřebení abrazí, ale aby zároveň byla abraze dostatečně velká k tomu, aby dokázala z povrchu odstranit fáze vznikající při vyšších teplotách. Toho lze nejlépe dosáhnout kombinací materiálů a jejich částic různých velikostí, tvarů i rozdílné tvrdosti [4].

1.1.2. Adheze

Dalším významným příspěvkem opotřebení v důsledku tření je adheze. Adhezi nelze eliminovat, lze ji pouze omezit, a je tak přítomna ve všech tribologických systémech. Jedná se o proces, kdy dojde k fyzickému spojení a následnému odtržení dvou ploch. Stěžejní je problematika tvorby tzv. můstků (z *angl. junction*). Ty se vytvoří, když dostatečně velká normálová síla přiblíží povrchy do těsného kontaktu a snadněji se tvoří mezi měkkými materiály. Velikost takového můstku se zvětšuje s rostoucími silami normálovými i tečnými, které v kombinaci způsobují plastickou deformaci. Můstek roste až do kritické velikosti, kdy pod napětím dojde k jeho zhroucení [4].

Zhroucení můstku

Rozlišujeme tři základní případy – ke zhroucení dojde buď v místě původního kontaktu, nebo ve slabším ze dvou materiálů, nebo v tom silnějším.

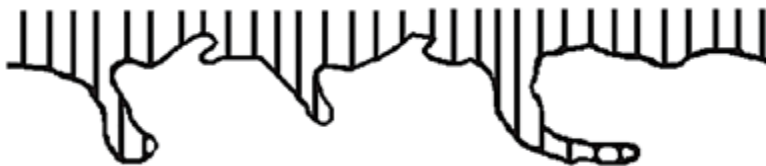
Nejideálnějším případem je lom na hranici, v místě původního kontaktu dvou ploch. V takovém případě je opotřebení nejmenší, může se jednat až o „nulové opotřebení“ (z angl. *zero wear*), které je definováno jako změna drsnosti povrchu menší než polovina největší výšky nerovností [4].

Pakliže dojde k lomu ve slabším ze dvou materiálů, je tento materiál zachycen materiálem druhého tělesa ze silnějšího (což obvykle znamená tvrdšího) materiálu. Následkem takového procesu je povlak slabšího materiálu na druhém povrchu. Pak se tedy o sebe třou dva povrchy, oba pokryté slabším materiálem, což vede k poměrně výraznému zvýšení opotřebení [4].

Dojde-li k lomu v silnějším (tedy obvykle tvrdším) materiálu, jeho úlomky se pak zachycují v měkčím materiálu. Takovéto výstupky tvrdých částic pak výrazně zvyšují abrazi, a tedy zároveň i opotřebení [4].

Vzájemné provázání povrchů

Vzájemné provázání povrchů (angl. *mutual interpenetration*) je možné u materiálů dostatečně měkkých, kujných nebo u materiálů, které podléhají creepu, tedy tečení. V takovém případě může být materiál vtlačen do dutin druhého povrchu a vytvořit tak mechanicky provázaný materiál, jak je patrné z obrázku 5. Taková interakce dokáže odolávat stříhu a znatelně tak zvyšuje tření [4].



Obr. 5. Vzájemné provázání povrchů [4].

Částice, které vzniknou adhezivním opotřebením, bývají obvykle malé. Je tedy otázkou, co se s nimi stane, když se oddělí od povrchu. Mohou se na něj vrátit, či se přichytit k povrchu druhému, nebo odletět do prostoru. Malé částice se povětšinou zachytí na některém z povrchů, stihnou-li však aglomerovat do větších celků, mohou snadněji odletět z povrchu pryč [4].

1.1.3. Chemické opotřebení

Pakliže se v materiálu uplatňují účinky elektrochemických reakcí či reakcí s okolním prostředím, hovoříme o chemickém opotřebení. Synonymem chemického opotřebení tedy může být i korozní opotřebení. Jedná se o velmi významný jev, jelikož chemickými reakcemi vznikají nové chemické sloučeniny s jinými vlastnostmi, než jaké měl původní materiál. Nejjednodušším příkladem může být oxidace železa na vzduchu za vzniku vrstvy oxidů železa. Je-li přítomna voda, může vzniknout směs oxidů a hydroxidů. Navíc s rostoucí teplotou roste i reaktivita a rychlost reakcí, přičemž základním principem brzdění je právě přeměna mechanické energie na energii tepelnou [4].

Častou příměsí ve frikčních kompozitech bývají sulfidy kovů. Jejich významnou vlastností je to, že dokáží tvořit souvislý film na povrchu frikčního kompozitu, zabránit přímému styku třecích ploch, čímž však nemusí snížit účinnost brzdění. Naopak většinou tyto sulfidy vykazují vysoké tření a zároveň dobrou odolnost proti otěru [4].

Provozujeme-li frikční kompozity obsahující sulfidy jako mazivo ve vlhkém prostředí, může dojít ke vzniku roztoku kyseliny sírové a kovových iontů, který je schopen tyto materiály poškodit. Nejen že může napadat základní materiál, ale může také rozložit ochrannou korozní vrstvu a obnažit tak nový povrch citlivý k další korozi [4].

Poznatky o pozitivních účincích koroze se využívají ve většině moderních kompozitů, zejména s ohledem na maziva. Reaktivní lubrikanty, jako jsou právě sulfidy kovů, produkují nejmenší otěrové částice a významně tak přispívají ke snížení opotřebení. Nejdůležitějším parametrem řízení chemického opotřebení je koncentrace. Už nízké koncentrace síry, asi 0,45 %, dokáží snížit opotřebení v systémech s dominancí železa. Vznikající sulfidy vytvoří souvislou vrstvu, zabrání přímému styku kovů a sníží tak opotřebení [4, 5].

1.1.4. Delaminace neboli únava

Únavové opotřebení se po delší době provozování projeví prakticky ve všech frikčních kompozitech. Jeho projevem je zejména vznik důlků a větších plochých prohlubní. Příčinou je lokální plastická deformace v částicích pod povrchem, ve kterých vzniknou mikrotrhliny. Tyto

mikrotrhliny mohou s rostoucím počtem cyklů růst (nejvíce ve směru relativního pohybu ploch) do trhlin a následně vést k odštěpení materiálu [4].

Únava může mít zásadní význam při porušení frikční vrstvy, zejména u tzv. suchých systémů. Amorfni frikční vrstva obvykle těžko odolává lokalizované plastické deformaci, a pak se následkem delaminace odlupuje [4]

1.2. Frikční vrstva

V centru dění při procesech tření se nachází frikční vrstva (angl. *third body layer*). Frikční vrstva je prostředníkem, který zajišťuje přeměnu mechanické pohybové energie v energii tepelnou. Mezi její funkce patří zajištění tření, snížení opotřebení, modifikace úlomků a stabilizace frikčního koeficientu. Zároveň může snížit vibrace [4].

V důsledku cyklického zvyšování teploty a tlaku dochází k výrazným změnám na třecí ploše. V případě osobních automobilů dosahují teploty brzdového obložení až 700°C, lokálně (na jednotlivých výstupcích) a na velmi krátkou dobu (cca. 1 ms) však může přesáhnout i 1000°C. U automobilů pracují bubnové brzdy při tlaku okolo 0,2 MPa, kotoučové pak asi při 1 MPa. Některé jiné aplikace pracují s tlaky až 4 MPa [2].

Frikční vrstva vzniká tak, že se úlomky vzniklé třením zachytávají v prohlubních v povrchu. Vytvoří tak novou amorfní vrstvu odlišnou od základního materiálu. V mnoha případech se jeví, jakoby materiál tekł jako viskózní kapalina. Struktura této vrstvy byla popsána jako jemnozrnná, prakticky však bez hranic zrn. To je přisuzováno opakované krystalizaci, usnadněné snížením teploty transformací v důsledku deformace. Tyto cyklické změny teploty způsobené kluzem materiálu tak vedou k amorfní struktuře. Bylo pozorováno, že na rozhraní například chybějí částice grafitu, které byly nahrazeny značně deformovaným kovem [4, 5, 6].

Důsledkem drastických podmínek dochází k ochuzení frikční vrstvy o organické látky a naopak k obohacení o látky anorganické. Vysoké teploty způsobí oxidaci kovů (železo, měď, mosaz) na povrchu. Frikční vrstva na povrchu brzdového obložení bývá 4 – 60 μm silná, na kovovém protějšku (kotouči, bubnu) se tvoří vrstva, zejména pryskyřic z obložení, 1 – 7 μm tlustá [2].



Obr. 6. Snímek frikční vrstvy [7].

Na obrázku 6 můžeme vidět světlejší, kovově lesklé oblasti. Právě ty představují frikční vrstvu. Velmi často frikční vrstva nevytvoří kontinuální film na celém povrchu, místo toho pozorujeme jakési ostrůvky. To je zapříčiněno tím, že vrstva roste rychleji v teplejších místech, zatímco v chladnějších místech roste pomaleji. Frikční vrstva jako taková se však vytváří velice rychle, prakticky okamžitě při prvním kontaktu. Při velmi vysokých teplotách se frikční vrstva zničí, součinitel tření poklesne a zároveň se výrazně zvýší míra opotřebení, při snížení teploty se však vrstva regeneruje [2, 4].

Tepelně ovlivněná zóna

Teplo vznikající při tření ovlivňuje materiál a jeho přeměny na nové fáze. Oblasti, kde tyto změny probíhají, říkáme tepelně ovlivněná zóna. Ta se neustále obnovuje, čili materiál může být třením odstraněn z povrchu, tepelně ovlivněná zóna i samotná frikční vrstva se však opět obnoví. Vzniká tak, že se přenosem tepla z rozhraní do objemu (bulku) materiálu spustí degradační procesy a nastanou již zmíněné změny. Tloušťka této zóny zůstává po celou dobu provozování brzdového systému prakticky stejná [4].

Mezi tepelně ovlivněnou zónou a neovlivněným materiálem neexistuje jasné rozhraní, změna je postupná. Na povrchu přechází ve frikční vrstvu. Její obnovování je dáno jednak opotřebením a jednak právě následnou přeměnou v tepelně ovlivněné zóně [8].

1.3. Vlastnosti třecích materiálů

Obecné požadavky na třecí materiály jsou následující:

- 1) dostatečná a dostatečně stabilní třecí úroveň,
- 2) odolnost vůči teplotě a oxidaci,
- 3) odolnost proti fade jevu a schopnost rychlé obnovy po ochlazení,
- 4) kompatibilita s kovovým protějškem – nesmí se příliš opotřebovávat,
- 5) odolnost proti opotřebení, tepelné únavě a praskání,
- 6) schopnost odolávat tlaku a střihu,
- 7) odolnost vůči prostředí (voda, olej, sůl),
- 8) minimum hluku a vibrací,
- 9) cena, životnost a snadná výroba.

Aby byly tyto vlastnosti splněny, musí být správně zvoleny jednotlivé složky směsi a výrobní postup [2, 9].

Jisté požadavky jsou kladeny rovněž na kovový protějšek (ocel, litina) a sice:

- 1) vysoká pevnost,
- 2) vysoká odolnost vůči únavě,
- 3) nízká tepelná kapacita a naopak vysoká tepelná vodivost.

Většina brzdových kotoučů a bubnů se vyrábí z perlitické litiny s tvrdostí podle Brinella v rozmezí 170 – 280 HB [2].

Mezi běžně stanovované veličiny patří zejména mechanické a fyzikální vlastnosti jako hustota (skutečná, teoretická, pyknometrická), porozita (otevřená, uzavřená, celková), pevnost v tlaku, či pevnost ve smyku (střihu), kdy se smyková síla snaží strhnout nalisovaný kompozit z nosného plechu. V této práci se však zaměříme zejména na stanovení frikční účinnosti a analýzu povrchu studovaných kompozitů [10].

Frikční účinnost

Brzdou neboli frikční účinností, lze definovat několika způsoby, např. součinitelem smykového tření, tlakem potřebným k vyvolání daného brzdného účinku, či vzdáleností potřebnou k zastavení vozidla z dané rychlosti [2].

Součinitel tření

Součinitel smykového tření, též frikční koeficient, je bezrozměrná skalární veličina určující poměr třecí síly mezi dvěma tělesy a normálovou silou, která na ně působí. Značíme jej běžně μ a definujeme jej tak, jako v rovnici 5:

$$\mu = \frac{F_t}{F} \quad (5)$$

kde μ je součinitel smykového tření (1),
 F_t - třecí síla působící proti směru pohybu (N),
 F - přítláčná síla, jež působí kolmo ke směru pohybu (N).

Jeho hodnota závisí na kombinaci obou povrchů, respektive materiálů. Hodnota 0 představuje nulové tření, v praxi nedosažitelné. Nejběžnější kombinace materiálů mají hodnoty součinitele tření mezi 0,3 a 0,6. Kombinace dvou suchých čistých skleněných povrchů dává přibližně hodnotu 1. Vyšší hodnoty vykazují například povrchy potažené akrylovou gumou [2, 11].

Dále rozlišujeme statický μ_s a kinetický μ_k součinitel tření. Statické tření je tření mezi dvěma nehybnými objekty a dokáže například zamezit kluzu tělesa na nakloněné rovině. Kinetické tření nastane mezi dvěma vzájemně se pohybujícími objekty a je nejčastěji nižší než tření statické [11].

Fade

Je-li vozidlo nuceno několikrát po sobě prudce brzdit, při každém dalším brzdění je nutno vynaložit větší normálovou sílu pro dosažení stejného brzdného účinku. Tomuto jevu se říká „fade“ (z *angl.*). Je způsoben rostoucí teplotou brzdového obložení, které tak ztrácí účinnost a součinitel tření klesá. Přesněji se definuje jako dočasné snížení třecí síly při zahřátí brzd vlivem termického rozkladu nebo částečného roztavení organických komponent. Ve větší míře můžeme tento jev sledovat u bubnových brzd, kde je odvod tepla horší [2, 12].

Výše popsaný děj představuje tzv. *dynamic fade* (případně *in stop brake fade*) a může být způsoben nevhodně zvoleným typem brzd, nesprávným brzděním nebo např. tím, že se třmen v důsledku špatné údržby nedokáže vrátit do původní polohy a obložení tak stále tře o protějšek. Druhým typem je tzv. *green fade* (či *early life brake fade*). Green fade může nastat pouze u nového brzdového obložení. Můžeme mu předejít tzv. zahořením brzd (angl. *scorching*) už ve výrobě na speciálních pecích [13].

Samotný pokles brzdného účinku je u nejčastějšího typu brzd, kterým jsou organické kompozity, způsoben tlakem par vypařující se fenolové pryskyřice. Nemá-li kam být odváděna, dokáže při dostatečném přehřátí, a tedy při dostatečné rychlosti odpařování, zabránit kontaktu třecích ploch [13].

Opotřebení

Abychom mohli zhodnotit chování frikčního kompozitu z hlediska dlouhodobého chování, sledujeme jeho opotřebení. Jedná se o ztrátu hmotnosti a objemu materiálu v důsledku tření. Je dáno obecným vztahem, viz rovnice 6:

$$W = K \cdot F^a \cdot V^b \cdot t^c \quad (6)$$

kde	W	je	opotřebení,
	K	-	konstanta,
	F	-	kolmá tlaková síla (N),
	V	-	rychlost vzájemného pohybu daného frikčního páru (m/s),
	t	-	doba tření (expozice) (s),
	a, b, c	-	parametry daného třecího páru při určité teplotě.

Opotřebení brzdové destičky (úbytek tloušťky) by mělo být asi dvakrát větší než opotřebení brzdového kotouče [4].

2. Frikční kompozity

Frikčním kompozitem nazýváme materiál, který má velkou odolnost proti opotřebení a zároveň se vyznačuje vysokým frikčním koeficientem, stálým v širokém teplotním spektru. Jejich úkoly jsou následující: přenášení vysokého krouticího momentu třením a zajištění definovaného pokluzu třecího páru. Tyto kompozitní materiály mají užití v brzdových a spojkových systémech, pracovat mohou za sucha, či v oleji [3].

Nejběžnější frikční kompozity používané v automobilech coby brzdové obložení jsou určeny pro tzv. suché použití. To znamená, že povrch obložení má být po většinu času suchý, ačkoli se během provozu vyskytnou vnější podmínky, jako je déšť [9].

2.1. Základní rozdělení frikčních kompozitů

Existuje několik skupin frikčních kompozitů. Mezi nejběžnější z nich patří organické kompozity na bázi fenolických pryskyřic. Ty se dále dělí na semi-metalické materiály (až 50 % podíl kovů) a na materiály s neazbestovými vlákny (NAO z angl. *non-asbestos organic*). Tyto kompozity obsahují celou škálu složek, kterých může být běžně až 20. Frikční koeficient μ se běžně pohybuje v rozmezí 0,30 až 0,50 [2, 4, 9, 14].

Další skupinu představují kovo-keramické a kovové frikční kompozity vyráběné práškovou metalurgií. Uplatnění nacházejí v aplikacích, které mají vysoké požadavky na výkon, případně na malé rozměry a hmotnost. Součinitel tření μ se u sintrovaných (slinovaných) kompozitů pohybuje kolem hodnoty 0,5 [2, 3, 15].

Poslední skupinou jsou kompozity uhlík-uhlík, tedy uhlíková vlákna v uhlíkové matici. Matrice představuje vytvrzenou pryskyřici, či uhlík nanášený metodami CVD. Tyto frikční kompozity jsou ze všech zde zmíněných skupin nejdražší. Jejich frikční koeficient μ může dosáhnout až hodnoty 0,6 [2, 3, 16].

2.2. Materiály pro výrobu frikčních kompozitů

Frikční kompozity se typicky skládají ze čtyř skupin komponent: 1) modifikátory tření, což jsou buď abraziva, nebo lubrikanty, 2) plniva, která nezhorší funkci, ale sníží výrobní cenu

kompozitu, 3) vláknité materiály poskytující výztuž a zvyšující pevnost kompozitu a 4) pojiva, která drží kompozit pohromadě [2, 9].

2.2.1. Modifikátory tření

Pojmem modifikátory tření (též funkční plniva) rozumíme látky, které upravují hodnoty tření a opotřebení, případně odvod tepla. Jedná se o lubrikanty, neboli maziva, a dále o abraziva a jiná funkční plniva. Maziva snižují jak součinitel tření, tak i míru opotřebení, abraziva je naopak zvyšují. Jak bylo vyzorováno, kompozity s vysokým podílem lubrikantů vykazují ustálenější hodnoty frikčního koeficientu, zatímco velký podíl abraziv zapříčiňuje jeho větší výkyvy. Z těchto důvodů je nutné hledat rovnováhu ve vzájemném poměru zmíněných složek [9, 17].

Maziva

Funkcí maziva je stabilizace součinitele tření během brzdění, a to zejména za vysokých teplot. Dále také zabraňují zadření brzd. Nejrozšířenějšími lubrikanty v suchých systémech jsou grafit a sulfidy kovů [9].

Abraziva

Úkolem abraziva ve frikčním kompozitu je zvýšení součinitele tření, přičemž se zároveň zvýší i opotřebení. Nejčastěji se jedná o tvrdé částice, jejichž typická Mohsova tvrdost se pohybuje mezi hodnotami 7 a 9. Jejich funkce spočívá v odstraňování nežádoucích povlaků, jako jsou oxidy železa, z protějšího povrchu. Nevýhodou frikčních materiálů s velkým obsahem abraziv je větší kolísání frikčního koeficientu [2, 9].

2.2.2. Plniva

Ačkoli plnivo nemá tak zásadní funkční úlohu, jakou mají například abraziva, stále dokáže výrazně ovlivnit vlastnosti kompozitu jako celku. Hlavním důvodem využívání plniv je snaha snížit cenu výrobku při zachování funkčních vlastností, ale také usnadnit jeho výrobu. Mnohdy se pojem plniva překrývá s jakoukoliv majoritní složkou směsi, ač se funkčně může jednat o abraziva [2, 9].

2.2.3. Vláknité materiály

Úlohou výztuhových vláken je poskytnout kompozitu potřebnou pevnost. Jak se ukázalo, zátěž vynaložená na desku při brzdění není rozložena na celý (zdánlivý) povrch této desky. Místo toho je soustředěna na výstupky vystupující z povrchu, což jsou právě tato vlákna výztuže obklopená ztuhnutými úlomky, které tvoří frikční vrstvu. Dále se ukázalo, že s klesajícím podílem vláknitých složek roste opotřebení třecích kompozitů. Nemały význam mají vlákna také pro zachování homogenity směsi po smíšení, jelikož na sebe navážou ostatní částice [9].

2.2.4. Pojiva

Pojivo má za úkol držet celý kompozit pohromadě v rámci celé škály podmínek provozování. Zásadní vlastností pojiva je jeho tepelná odolnost. Kdyby totiž pojivo degradovalo, celý kompozit by se rozpadl a ztratil funkčnost [9].

2.3. Kovové a kovo-keramické frikční kompozity

Tyto materiály se vyrábějí metodou práškové metalurgie z kovových i nekovových prášků. Používají se hlavně tam, kde jsou vysoké požadavky na výkon, ale také na rozměrově i hmotnostně úsporné řešení. Mají totiž vysokou brzdovou účinnost a mohou tak být při stejném brzděném výkonu menší než například organické brzdové systémy. Dále vykazují vysokou tepelnou vodivost a stabilitu frikčních vlastností za vysokých teplot. Kovo-keramické kompozity se někdy označují také jako cermety (z angl. *ceramic-metal*) [2, 3].

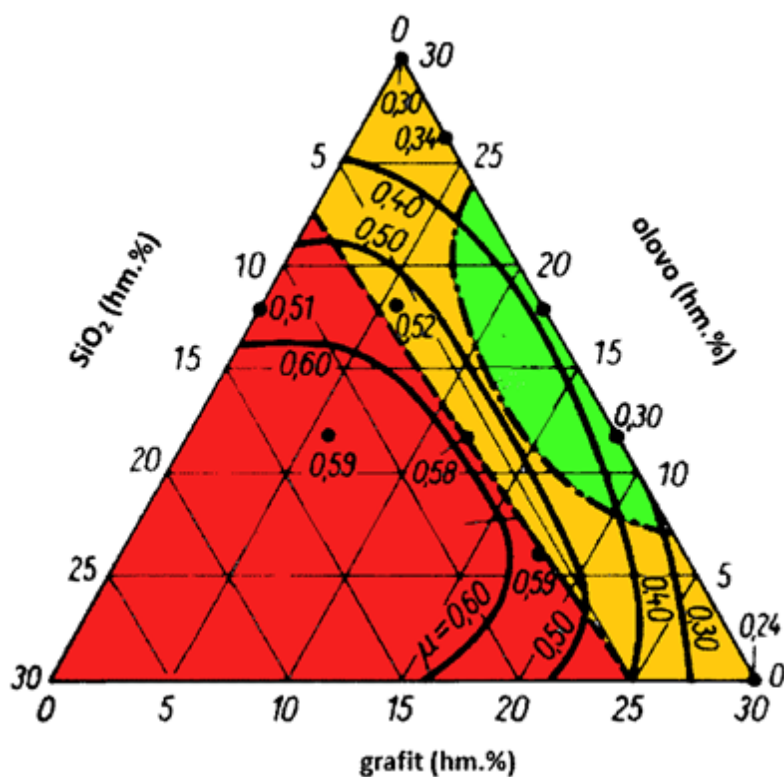
Základním kovem, tedy pojivem, bývá nejčastěji železo, měď, či bronz. Dále se používají nekovové složky v různých úlohách. Například SiO_2 , Al_2O_3 a mullit, jakožto tvrdé abrazivní částice zvyšují součinitel tření. Grafit, přírodní sulfidy (jako antimonit, galenit, sfalerit, molybdenit), případně olovo jsou tuhá maziva zabraňující zadření frikčního systému a stabilizující frikční koeficient. Běžným plnivem je pak baryt BaSO_4 , jako pojivo pak slouží také mastek [2, 3].

2.3.1. Kompozity na bázi mědi

Třecí kompozity na bázi mědi nacházejí uplatnění zejména u vysoce náročných spojkových a brzdových systémů. Největší zastoupení mají bronzy (Cu-Sn), dále pak slitiny

s manganem, niklem, chromem, kobaltem, či titanem. Zvláštní zajímavost systému Cu-Ti je dána jeho příznivým průběhem slinování i jeho vytvrditelností. Tyto vlastnosti jej předurčují k vysokovýkonovým aplikacím [3].

U bronzů Cu-Sn je možné dosáhnout zvýšení meze kluzu o 20 až 30 % pouze zvýšením teploty slinování ze 750 na 850 °C. Pro systém 70 % CuSn10 je na obrázku 7 znázorněn ternární diagram otěrových a frikčních vlastností (součinitel tření μ) v závislosti na poměru grafitu, olova a oxidu křemičitého. Plné čáry představují konstantní součinitel tření. Zelená oblast představuje ideální vlastnosti a klidný běh brzdového systému. Oranžová oblast znázorňuje vyšší brzdový účinek a nižší komfort brzdění, což může být vhodné u náročných či průmyslových aplikací. V červené oblasti hrozí zadření brzd. Z diagramu je zřejmé, že podíl SiO_2 musí být nižší než 8 % hm., zatímco obsah grafitu a olova musí být poměrně vysoký [3].



Obr. 7. Ternární diagram systému 70 % Cu-Sn10 [10].

Vhodným materiálem protějšku ve frikčním páru je šedá litina, uhlíková ocel, dále také zušlechtěné, nízkolegované, vytvrditelné i nevytvrditelné oceli. Takové třecí dvojice mají využití u zemních a silničních stavebních strojů, traktorů, zvedacích zařízení, jeřábů, lisů, brzdících motorů i letadel [3].

2.3.2. Kompozity na bázi železa

Frikční kompozity na bázi železa mají několik výhod oproti těm na bázi mědi. Předně jde o úsporu neželezných kovů a nižší cenu, dále také vysoký součinitel tření. Zároveň mají uspokojivou odolnost vůči opotřebení. Hlavní příměsí je grafit, tvořící 10 až 30 % podíl. Nad 25 % grafitu však již výrazně klesá pevnost a použití je pak problematické. Do směsi se přidávají rovněž nízkotavitelné kovy (olovo, bismut, cín, kadmium), které se rozpustí, ale se základní kovovou maticí nevytvoří tuhý roztok. Přitom výrazně snižují otěr. Stabilizaci frikčních vlastností zajišťují nekovové látky jako azbest (dříve, dnes zakázán), mulit, křemen, či silimanit. Tvorbu a stabilizaci frikční vrstvy podporují například karbidy kovů, fosfidy, nitridy, případně sulfidy (FeS , PbS , Mo_2S , Sb_2S_3) [3].

2.3.3. Kompozity s vysokým podílem nekovů

Keramické komponenty jsou pro svou teplotní stálost vhodné k provozování v náročných podmínkách. Základní maticí pak tvoří nejčastěji slitiny mědi, ale také slitiny železa, molybden, či nikl. Nekovovými přísadami jsou nerosty, například mulit, silimanit, silikáty, dále kovové oxidy (Al_2O_3 , SiO_2 , MgO , TiO_2). Modifikátory frikčních vlastností představují látky jako je grafit, nízkotavitelné kovy, karbidy, fosfidy, či sulfidy. Objemový podíl nekovových přísad v kovové matici může být i větší než 50 % [3].

2.3.4. Výroba kovo-keramických frikčních kompozitů

Výroba těchto materiálů začíná smísením směsi o požadovaném složení a dané granulometrii. Směs se pak nalisuje na nosné plechy, které byly galvanicky pokoveny mědí. Lisování probíhá v ochranné atmosféře dusíku, vodíku, či čpavku. Následují operace jako je dolisování, či zbroušení na požadovanou výšku [2, 3].

Pro vysoký podíl nekovových částic je nutné, aby kovová matrice byla dostatečně pevná. Zásadní charakteristikou je slinovací aktivita prášků. Proto se používají zejména houbovitě a dendritické prášky s velikostí částic menší než 150 μm . Běžné lisovací tlaky se pohybují v rozmezí 200 až 400 MPa. Slinovací teplota je vždy menší než teplota tavení jednotlivých kovů. Pro materiály na bázi železa se slinovací teplota pohybuje od 950 do 1150 $^{\circ}\text{C}$, u měděných pak mezi 600 a 950 $^{\circ}\text{C}$ [2, 3].

2.4. Organické frikční kompozity

Nejčastějším typem brzdového obložení, vyskytujícím se prakticky u všech běžných automobilů, jsou organické frikční kompozity. Ve frikčních kompozitech na bázi organických pryskyřic můžeme nalézt prakticky všechny typy látek od kovů až po kaučuky [2, 9].

2.4.1. Modifikátory tření v organických kompozitech

Modifikátory tření (též funkční plniva) jsou jednak maziva a jednak abraziva. Můžeme zde zařadit i kovové prášky, které se v těchto kompozitech používají hlavně pro svou vysokou tepelnou vodivost [4, 9].

Maziva

Nejčastějším tuhým mazivem je grafit. Grafit je možno použít jak přírodní, tak syntetický. Jeho velkou výhodou je schopnost vytvořit poměrně souvislou vrstvu na frikčním povrchu. Tato vrstva zajišťuje stálý součinitel tření a také se sama obnovuje [9].

Kromě grafitu se jako maziva ve velké míře uplatňují i přírodní sulfidy kovů. Nejčastěji jde o sulfidické materiály s vrstevnatou strukturou, která se podobá grafitu, a sice: stibnit (Sb_2S_3), galenit (PbS), molybdenit (MoS_2), sfalerit (ZnS) a další. Tyto sulfidy se zdají být lepšími mazivy, než je grafit, jelikož grafit je náchylný k větší míře opotřebení z důvodu slabé vazby mezi ním a fenolovou pryskyřicí. Prakticky všechny zmíněné sulfidy jsou ve vodě nerozpustné, jsou však rozpustné v některých zředěných kyselinách [2, 9].

Abraziva

Mezi běžně používaná abraziva můžeme zařadit například korund (Al_2O_3), jehož tvrdost stupně 9 na Mohsově stupnici ho činí jedním z nejtvrďších minerálů. Dále se používají křemen (SiO_2), zirkon (ZrSiO_4), chromit (FeCr_2O_4) či karbid křemíku (SiC). Všechny tyto sloučeniny jsou velice odolné jak chemicky, tak i tepelně [2].

Kovové prášky

Další skupinou funkčních plniv jsou kovové prášky, či šupinky, jejichž úkolem je zejména odvod tepla tak, aby se zamezilo poklesu frikčního koeficientu vlivem vysoké teploty. Nejběžněji

se používají ocelové, mosazné či měděné prášky. Nevýhodou ocelových prášků je jejich náchylnost ke korozi, zvláště za nepříznivých povětrnostních podmínek [2, 9].

2.4.2. Plniva v organických kompozitech

Nejzákladnější rozdělení plniv je na organická a anorganická, volba konkrétní látky však závisí vždy na ostatních komponentech mixu a na požadovaných vlastnostech produktu [2, 9].

Anorganická plniva

Typickými zástupci anorganických plniv jsou baryt (BaSO_4), vermikulit, slída a kalcit (CaCO_3). Všechny tyto látky mají vysoký bod tání. Nejvýše z nich je síran barnatý ($1350\text{ }^\circ\text{C}$), nejnižší pak vermikulit, který se při teplotě vyšší než $800\text{ }^\circ\text{C}$ rozkládá [2, 9].

Slída je schopna pohlcovat nízkofrekvenční hluk vznikající při brzdění, a to díky své zesíťované planární struktuře. Abychom omezili její nesoudržnost, je možno opatřit slídový prášek povlakem fosforečnanu hlinitého. Slídě podobný vermikulit, který se jí podobá i svou zesíťovanou strukturou, je rovněž schopen potlačit hluk při brzdění. Vermikulit je ale na rozdíl od slídy porézní a jeho otěruvzdornost při vyšších teplotách je nižší [9].

V nedávné době se začaly používat další dvě látky – oxid molybdenu MoO_3 a titanáty alkalických kovů (například titanát sodný) [18, 19].

Organická plniva

Prášek z oleje kešu ořechů a gumový prášek patří mezi běžná organická plniva. Pro své viskoelastické vlastnosti se používají především za účelem snížení hluku. Oba tyto prášky, zejména kešu, snadno odpadávají z povrchu a zanechávají po sobě velké póry, ze kterých se můžou začít šířit trhliny. Předejít se tomu dá nanesením lepidla na prášek. Jejich nízká tepelná vodivost je důvodem toho, proč je mnozí výrobci nepoužívají přímo do směsi, místo toho je dají do podkladové vrstvy [9].

2.4.3. Vláknité materiály v organických kompozitech

Do organických kompozitů se přidávají nejrůznější typy vláken. V minulosti byla nejčastější azbestová vlákna, dnes jsou nahrazena jinými [9].

Azbestová vlákna

Až do 80. let minulého století se ve frikčních kompozitech v hojné míře využíval azbest. Azbest byl levný, velmi odolný a tepelně stabilní. To je klíčová vlastnost vzhledem k tomu, že při brzdění se běžně dosahuje teplot v řádech stovek stupňů Celsia. V 80. letech však vešly do povědomí jeho karcinogenní účinky, a tak začal být nahrazován jinými materiály [9].

Skleněná vlákna

Jejich výhodami jsou vysoká mechanická pevnost, zejména ve spojení s pryskyřicemi, a dále vysoký bod tání (1450 °C) ve srovnání s azbestem (800-850 °C). Nevýhodami jsou jednak velmi nízká tepelná vodivost, která brání efektivnímu odvodu tepla, a jednak jejich křehkost [9].

Aramidová vlákna

Aramidy, neboli aromatické (poly)amidy, jsou velice lehké a zároveň pevné a snadno se zpracovávají do vláken dloužením. Navíc jsou vysoce odolné vůči vysokým teplotám. Dalšími výhodami jsou vysoká uniformita směsi, které je možno při použití těchto vláken dosáhnout, a také značná odolnost proti opotřebení [9].

Keramická vlákna

Mezi běžná keramická vlákna řadíme hlavně oxidy kovů, předně oxid hlinitý, a dále karbidy, za všechny karbid křemičitý. Jejich velkou předností je jednak velmi vysoká tepelná odolnost, která je dána vysokými body tání (až 3000 °C), a jednak vysoký poměr mechanických vlastností vzhledem ke hmotnosti [9].

2.4.4. Pojiva v organických kompozitech

Pojivem v těchto kompozitech jsou právě organické pryskyřice. Nejčastěji jsou to pryskyřice fenolové, fenolformaldehydové a látky od nich odvozené [2, 9].

Fenolové pryskyřice

Fenolové nebo fenolformaldehydové pryskyřice jsou nejběžnějším typem pojiva ve frikčních kompozitech, také pro svou nízkou cenu. Nežádoucí křehkost těchto pryskyřic můžeme potlačit přidávkou plastifikátoru, jako je například nitrilová pryž [2, 9].

Tyto pryskyřice se rozkládají při teplotách vyšších než 450 °C. Při brzdění však mohou teploty vyrůst mnohem výše a kompozit pak ztrácí svou kompaktnost, roste porozita. Proto se používají pryskyřice modifikované [9].

Pryskyřice modifikované silikonem

Jednou z možností modifikovat fenolové pryskyřice je přidavek silikonového oleje, čili polymerního siloxanu. Snižuje jejich křehkost a zároveň zlepšuje tepelnou stabilitu. Jejich hydrofobní účinky také zamezují absorpci vody [9].

Pryskyřice modifikované epoxidem

Samotné epoxidové pryskyřice nedokážou snášet vysoké teploty, nad 290 °C degradují. Byly popsány speciální pryskyřice ošetřené anhydridy, které jsou poměrně stabilní až do 400 °C, ale to je stále méně, než mají samotné fenolformaldehydové pryskyřice. Kombinací těchto dvou látek však vznikne pryskyřice s lepší tepelnou odolností i lepšími frikčními vlastnostmi [9].

2.4.5. Výroba organických frikčních kompozitů

Typický způsob výroby organických frikčních kompozitů zahrnuje míchání a homogenizaci komponent s lisovací fenolickou hmotou ve formě prášku. Dále se směs lisuje do formy a za zvýšeného tlaku se zahřívá. Pryskyřice působením tepla přejde do plastického stavu a následně se vytvrdí. Na vytvrzení stačí teplota cca. 160 až 200 °C [2].

2.5. Kompozity uhlík-uhlík

Uhlíkové kompozity v sobě spojují mnoho pozitivních vlastností, předně vysoký a teplotně stabilní frikční koeficient, nízký otěr, nízkou měrnou hmotnost, dobré mechanické vlastnosti a vysokou odolnost proti únavě. Dalšími přednostmi jsou vysoký bod tání (3000 °C), velká skutečná třecí plocha se stálou geometrií, vysoká tepelná kapacita i tepelná vodivost a konečně i nízká tepelná roztažnost. Negativem je však časově i finančně náročná výroba [2].

Jejich výroba začíná pyrolýzou polymerních vláken, či jiného na uhlík bohatého prekurzoru při teplotě asi 2500 °C za současného tažení do vlákna. Následuje stabilizace, karbonizace a grafitizace, kdy teplota přesáhne 3000 °C. Okolo vláken je pak potřeba vytvořit uhlíkatou matici, což se dělá dvojím způsobem [2].

První a dražší způsob spočívá v chemické depozici, či infiltraci par (CVD/CVI), kdy je připravená uhlíková tkanina vystavena proudu plyných organických sloučenin (metan, benzen, acetylen) a vodíku, ve kterém se tento plyn rozkládá. Vzniklý pyrolytický uhlík se nanáší na vlákna. Tento proces se musí několikrát opakovat a výroba tak zabere i několik týdnů [2].

Druhou možností je použití tepelně vytvrditelných pryskyřic (epoxidových nebo fenolformaldehydových). Vlákná s pryskyřicí se karbonizují při 1000 °C a proces se opakuje až 12x, a pak následuje chemická infiltrace par (CVI). Nakonec se provede opět grafitizace při 3000 °C [2].

Kompozity typu uhlík-uhlík se mohou dále modifikovat například přidávkou SiC, či keramickými přísadami. Uplatnění nacházejí v těch nejnáročnějších aplikacích, jako jsou přistávací brzdy letadel, či brzdy a spojky závodních vozů [2, 3, 16].

3. Testování frikční účinnosti

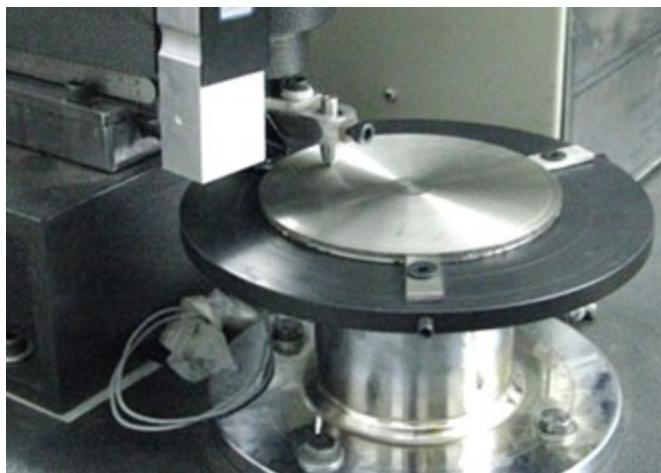
Procesy tření a opotřebení jsou ovlivňovány celou řadou faktorů. Nejvýznamnějšími z nich jsou tlak, teplota, rychlost vzájemného pohybu, použítá maziva a celkové složení obou třecích ploch. Proto bylo vyvinuto mnoho metod, které více či méně věrně simulují celou škálu provozních podmínek. Tyto podmínky jsme při testech schopni regulovat a předvídat tak chování frikčních kompozitů v reálném provozu. Právě řízení vnějších podmínek a jejich přiblížení reálnému světu je to, co se po testovacích zařízeních požaduje, avšak s ohledem na náklady [4].

3.1. Sub-scale testery

Testy na těchto zařízeních, jak již název napovídá, probíhají ve zmenšeném měřítku. Patří sem např. pin-on-disc, chase tester či FAST tester. Výsledky těchto zkušebních metod mají svou vypovídací hodnotu a dají se použít zejména pro rychlé testování nových materiálů, korelace jejich výsledků s daty z reálného provozu však bývá obtížná [4].

3.1.1. Pin-on-disc tester

Mezi nejjednodušší laboratorní testery patří pin-on-disc. Na vzorek tvaru disku se přitlačuje těleso tvaru kuličky, či válečku. Příklad takového zařízení můžeme vidět na obrázku 8. Přítlačná síla i rychlost rotace je regulována, sleduje se stopa, kterou pin v disku zanechává [4, 21].

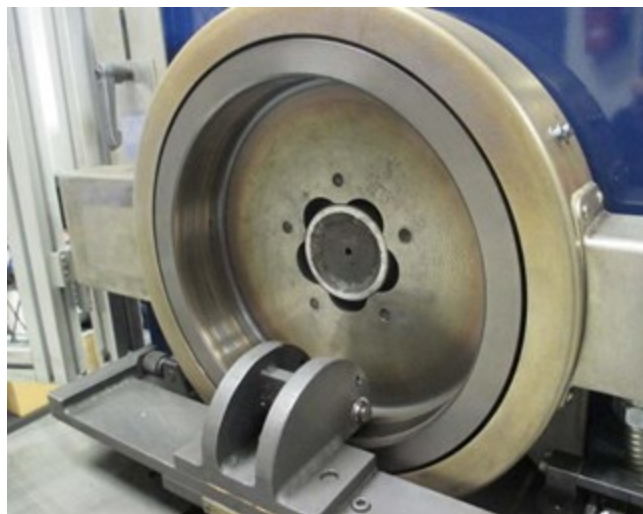


Obr. 8. Pin-on-disc tester [20].

Analýza stopy ve studovaném materiálu disku se zaměřuje na tvar, hloubku a okolí stopy v závislosti na již zmíněné přitlačné síle a rychlosti otáčení, ale také na počtu cyklů, geometrii tělíska, okolní teplotě a použitém mazivu [4, 21].

3.1.2. Chase tester

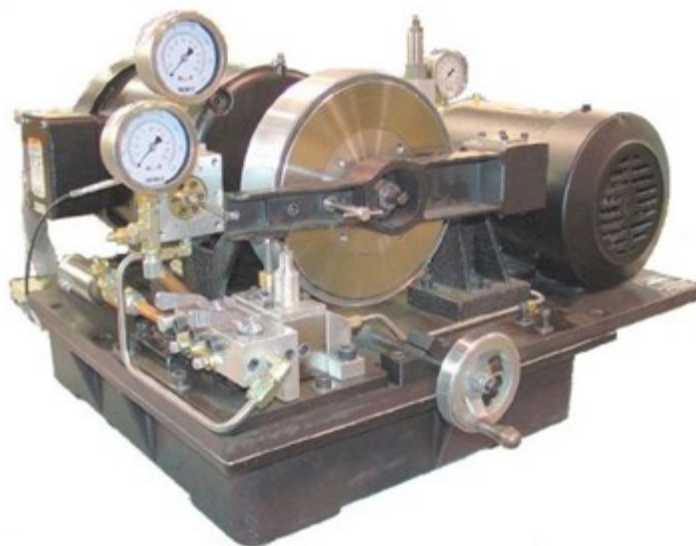
Toto zařízení používá poměrně malý vzorek brzdového obložení v brzdovém bubnu, jak můžeme vidět níže na obrázku 9. Je to metoda vhodná pro rychlé porovnání vzorků o různém složení, její výsledky se však opět poměrně těžko srovnávají s výsledky jiných metod. Testování se řídí normou SAE J661a. Nominální hodnoty frikčního koeficientu z tohoto testu slouží pro orientaci výrobců. Výrobci na severoamerickém trhu se snaží u svých materiálů dosáhnout hodnot v rozmezí 0,35-0,45 a evropští výrobci většinou 0,45-0,55 [4].



Obr. 9. Chase tester [22].

3.1.3. FAST tester

FAST je anglická zkratka pro Friction Assessment Screening Test. Byl vyvinut ve společnosti Ford Motor Company. Podobně jako pin-on-disc, používá i FAST tester malé zkušební těleso proti plochému povrchu. Typický testovací cyklus trvá 90 minut a umožňuje snadné srovnání různých materiálů a jejich vlastností. Od roku 1967 musely všechny modely značky Ford projít testováním na tomto zařízení, které můžeme vidět na obrázku 10. Kromě toho je tato metoda rozšířená i na akademické půdě [4].



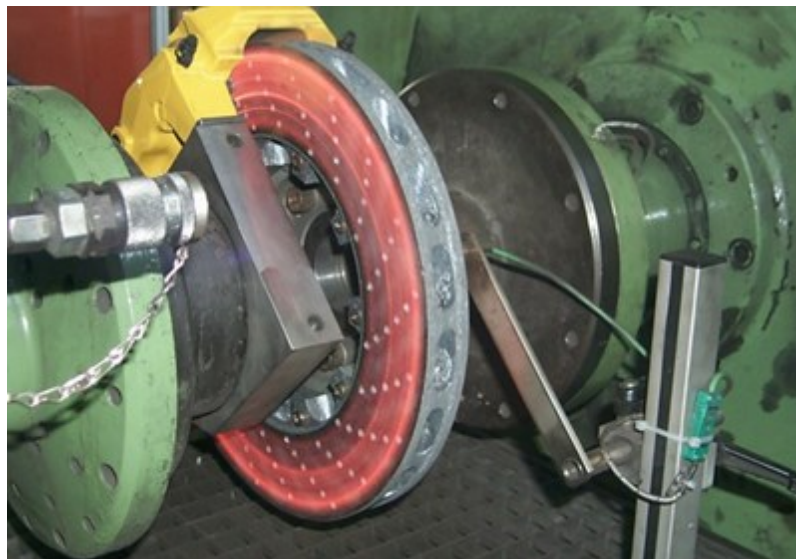
Obr. 10. FAST tester [23].

3.2. Full-scale testery

Mezi full-scale testery neboli testery pracující v reálném měřítku, řadíme Krauss testery a brzdové dynamometry. Tato zařízení používají při testování prototypové nebo produkční kusy brzdového obložení v životní velikosti. Mají tedy větší vypovídací hodnotu než sub-scale testery, jsou ale nákladnější [4].

3.2.1. Krauss tester

Testování na zařízeních typu Krauss, které můžeme vidět na obrázku 10, je rozšířeno hlavně v Evropě. Může testovat jak brzdy kotoučové, tak i bubnové. Na rozdíl od níže uvedených dynamometrů nemá testovací zařízení typu Krauss setrvačníky. V podstatě se třením brzdí přímo motor pohonné jednotky. Jeho variabilita zajistila Krauss testeru značnou oblibu jak v průmyslu, tak i v akademických kruzích [4].



Obr. 11. Zařízení pro Krauss testy [24].

3.2.2. Brzdový dynamometr

Setrvačnickové dynamometry (obrázek 12) jsou velice nákladná zařízení, která se mohou vyskytovat v různých modifikacích. Nejčastěji mají polovinu nápravy, někdy i tlumiče a odpružení a jedno kolo, či jen brzdový kotouč a příslušný brzdový systém reálného vozidla. Dynamometry jsou vybaveny setrvačnickovými koly, která simulují hybnost vozidla. Jakmile soustava dosáhne požadované rychlosti, odpojí se pohon a okamžitě se spustí brzdový systém [4].



Obr. 12. Brzdový dynamometr [25].

Sofistikovaná softwarová instrumentace moderních dynamometrů umožňuje kontrolu mnoha parametrů, mezi nimi rychlost, teplotu, tlak, zpomalení, apod. v různých módech. To zaručuje vysokou opakovatelnost a snadnou korelaci s reálným provozem brzdových systémů [4].

Vysoké pořizovací náklady se projevují také do ceny jednotlivých testů. Jedna testovací procedura, která může být dlouhá i několik týdnů, či měsíců, může překročit hranici 250 000 Kč. Proto se vždy musí zvážit, zda je nutné provádět testy na dynamometru, nebo jestli je vhodný méně nákladný sub-scale test [4].

Normované testovací procedury pro dynamometrické zkoušky

Existuje mnoho různých norem týkajících se dynamometrických zkoušek, zde však vyjmenujeme jen ty nejdůležitější a v našich podmínkách nejběžnější.

ISO 26867

Norma ISO 26867, plným anglickým názvem „*Road vehicles - Brake lining friction materials - Friction behaviour assessment for automotive brake systems*“, popisuje vliv tlaku, teploty a lineární rychlosti na součinitel tření daného frikčního páru. Zahrnuje 167 brzdných cyklů ve 24 sekcích. Brzdný cyklus zahrnuje brzdění, chlazení a nové zrychlení na danou výchozí rychlost. Sekce simulující fade jsou řízeny dle teploty [26].

SAE J2522

Celý název zní „*Dynamometer Global Brake Effectiveness*“. Jedná se o normu pro setrvačnickové dynamometry, která porovnává účinnost třecích materiálů určených pro motorová vozidla s hydraulickým brzdovým systémem. Porovnává se účinnost při různém tlaku, teplotě a rychlosti. Norma si klade za cíl co nejpřesnější definici podmínek pro maximální možnou opakovatelnost výsledků. Obsahuje 20 sekcí s různým počtem cyklů na sekci, celkový počet cyklů je 404. Stejně jako u výše zmíněné norma jsou fade sekce řízeny dle teploty [27].

SAE J2707

Název „*Wear Test Procedure on Inertia Dynamometer for Brake Friction Materials*“ napovídá, že se jedná o normu stanovující postup a vyhodnocení opotřebení brzdových kotoučů a bubnů a brzdového obložení u automobilů. Testovací procedura zahrnuje asi desetkrát více brzdných cyklů než norma SAE J2522 [28].

4. Metody strukturní a fázové analýzy

Pro stanovení požadovaných vlastností byly vzorky zkoumány vybranými analytickými metodami, popsány níže.

4.1. Optická mikroskopie

Pro základní charakterizaci a popis povrchu se běžně používá optická mikroskopie. V případě frikčních kompozitů jde hlavně o popis jednotlivých složek a jejich granulometrii, tedy velikost zrna. Moderní optické mikroskopy umí zaostřit postupně jednotlivé „vrstvy“ výškově členitého povrchu a výsledný obraz pak složit pomocí softwaru. Takové přístroje mohou rovněž umět i vykreslit výškový profil vzorku [3, 29].

4.2. SEM-EDX

Skenovací (řádkovací, či rastrovací) elektronová mikroskopie (SEM) poskytuje mnohem více informací o povrchu vzorku. Zobrazení v režimu sekundárních elektronů umožňuje zobrazení povrchu s velkou hloubkou ostrosti a výrazným topografickým kontrastem, který dává snímku trojrozměrný vzhled. Zobrazení zpětně odražených elektronů dává obraz, na kterém lze rozlišit jednotlivé oblasti s rozdílným chemickým složením. Kontrast je zde totiž způsoben rozdílným atomovým číslem prvků. Těžší prvky s vyšším atomovým číslem odrážejí elektrony více, a proto oblasti s vyšším podílem těchto těžších prvků svítí jasněji. Naopak oblasti s více lehkými prvky svítí méně jasně [2, 29].

Elektronová mikroanalýza (MA) dává informace o prvkovém složení zkoumaného vzorku. Vyhodnocovat lze ve dvou režimech: vlnově disperzní spektroskopie (*wavelength dispersive X-ray spectroscopy* – WDX) a energiově disperzní spektroskopie (*energy dispersive X-ray spectroscopy* – EDX). U WDX dopadají jednotlivé svazky záření na detektor a jejich energie je při známé mezirovinné vzdálenosti dána Braggovým vztahem. Při EDX je vyhodnocováno celé spektrum najednou. Proto má WDX lepší rozlišení, ale také tato analýza trvá déle. Častěji se tedy používá EDX, pokud chceme znát prvkové složení alespoň orientačně (cca. na desetinu hmotnostního procenta). Problémem této analýzy je zejména nadhodnocení obsahu uhlíku [2, 30].

4.3. XRFS

Rentgenová fluorescenční spektroskopie (angl. *X-ray Fluorescence Spectroscopy*) je analytická metoda umožňující přímou prvkovou analýzu pevných vzorků. Dopadající rentgenové záření vybudí charakteristické záření jednotlivých atomů. Analýza pak probíhá podobně jako u elektronové mikroanalýzy v energiově, či vlnově disperzním módu, dle daného analyzátoru [2].

Výhodou této metody je velmi snadná příprava vzorku. Stačí rovný povrch a rozměry umožňující umístění do měřicí komory. Je tedy možné analyzovat celou brzdovou desku v kuse. Další výhodou je možnost rozlišení jednotlivých forem daného prvku, tedy např. organického uhlíku v pryskyřicích a uhlíku v grafitu, či síry v síranech a sulfidech. Nevýhodou je nutnost kalibrace přístroje na daný vzorek referenčním materiálem o podobném složení. Je tedy vhodné předem znát alespoň orientační složení daného vzorku [2].

4.4. Ramanova spektroskopie

Ramanova spektroskopie přináší informace o molekulovém složení vzorku. Dokážeme tak určit přímo které sloučeniny se ve vzorku nacházejí. K vybuzení elektronů se používá laserový paprsek z viditelné oblasti spektra, případně z blízké infračervené, či blízké ultrafialové oblasti. Běžný elastický rozptyl vybuzených elektronů se nazývá Rayleighův rozptyl. Při něm je elektron z molekulového orbitalu fotonem laseru vybuzen na virtuální energetickou hladinu a následně se vrátí do původního stavu. To nám nepřináší žádnou analytickou informaci [31].

Dojde-li k tomu, že se elektron po vybuzení na virtuální hladinu vrátí na jinou než původní hladinu, jedná se o Ramanův rozptyl, který má dvě podskupiny. Vráť-li se na hladinu vyšší než byla původní, vyzáří foton o větší vlnové délce a mluvíme o tzv. Stokesově rozptylu. Když se vrátí na hladinu nižší než původní, vyzáří foton o nižší vlnové délce a nastává tzv. anti-Stokesův rozptyl [31].

Tyto neelastické rozptyly nám poskytují informace o charakteristických energetických hladinách v dané molekule. Intenzita Ramanova záření je mnohem nižší než intenzita vstupního svazku. Proto je nutné použít silný laserový svazek a následně jeho vlnovou délku ze spektra odfiltrovat. Zůstane tak záření o vlnových délkách nižších a vyšších, než mělo původní záření laseru. Takto vzniklé spektrum se následně srovnává s databází [31].

5. Experimentální část

V experimentální části práce byly posuzovány tři vzorky. Cílem bylo vzájemné porovnání dvou různých kovo-keramických frikčních kompozitů a následné srovnání s komerčním typem semi-metalických organických brzdových desek. Toto srovnání s organickými deskami bylo provedeno jen s ohledem na frikční účinnost, opotřebení a rozdělení velikosti otěrových částic, jelikož z hlediska složení a struktury se jedná o neporovnatelně odlišné materiály.

Byly provedeny dynamometrické zkoušky, kterými byly stanoveny součinitele tření, a také otěr a úbytek materiálu. Dále byly pořízeny snímky povrchu i leštěného řezu vzorků ve výchozím stavu. Následně byl snímán také povrch vzorků po dynamometrických zkouškách. To vše jednak na optickém mikroskopu, na kterém byly sestaveny i výškové profily povrchů, a jednak na skenovacím elektronovém mikroskopu (SEM).

Na SEM byly provedeny také EDX analýzy, které poskytují orientační analýzu složení vzorků. Opět měřeno na vzorcích v dodaném stavu i ve stavu po dynamometrických zkouškách. Pro přesnější stanovení prvkového složení byla provedena také XRFS analýza vzorků. Majoritně zastoupené sloučeniny byly stanoveny pomocí Ramanovy spektroskopie.

5.1. Vzorky

Studovány byly tři vzorky: A, B a C. Vzorky A a B představovaly kovo-keramické brzdové destičky, které jsou běžně používány v brzdných systémech průmyslových aplikací, jde například o brzdové systémy jeřábových strojů a větrných elektráren. Vzorek C byl komerční semi-metalický typ organického brzdového obložení běžně používaný v osobních automobilech. Tento vzorek byl použit pouze pro srovnání frikční účinnosti, opotřebení a vznikajících otěrových částic mezi různými typy kompozitních materiálů.

Ve zmíněných průmyslových aplikacích jsou na frikční materiály kladeny zcela jiné požadavky, než je tomu u automobilových brzdových systémů. Průmyslové stroje pracují s daleko většími kroutícími momenty, avšak v menších otáčkách než u automobilů. Proto lze čekat, že jejich frikční vlastnosti budou také odlišné. Vzorky pro testy na dynamometru představují vždy dvojici desek stejného kompozitu a jim příslušný brzdový kotouč. Všechny tři kotouče byly identické, běžně dostupné v prodejní síti a vyrobené z litiny.

Vzorek A

Prvním testovaným vzorkem byl vzorek A. Směs byla na galvanicky poměděném podkladovém plechu napečena a přichycena difúzním spojením. Desky nebyly žádným způsobem mechanicky opracovány, na požadovanou tloušťku a pro zajištění požadované geometrie byly kalibrovány, viz obrázek 13.



Obr. 13. Vzorek A ve výchozím stavu.

Vzorek B

Vzorek B byl také kovo-keramickým kompozitem, avšak s jiným složením směsi než vzorek A. Stejně jako u vzorku A bylo spojení mezi poměděným nosným plechem a směsí tvořeno difúzním spojem. Výrobní postup byl obdobný jako u vzorku A, viz obrázek 14.



Obr. 14. Vzorek B ve výchozím stavu.

Vzorek C

Vzorek C byl semi-metalický organický frikční kompozit. Tento typ je běžně používán u osobních automobilů a je běžně dostupný v obchodní síti. Spojení mezi nosným plechem a směsí je zajištěno lepidlem a podkladovou vrstvou. Jednou z konečných výrobních operací bylo broušení na požadovanou tloušťku, stopy po broušení jsou patrné na obrázku 15.



Obr. 15. Vzorek C ve výchozím stavu.

5.2. Dynamometrické zkoušky

Testování frikčních vlastností bylo provedeno na brzdovém dynamometru Link M2800 (na obrázku 16), který se nachází v Laboratoři testování frikčních kompozitů Centra nanotechnologií (CNT) Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava (VŠB-TUO). Jeho parametry jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1. Parametry dynamometru Link M2800.

Motor	napájení	stejnoseměrné DC
	výkon	93 kW
	max. otáčky	3600 ot./min.
Setrvačníky	mechanické	max. 148,5 kg·m ²
	elektrická simulace	max. 245 kg·m ²
Hydraulika	tlak v hydr. soustavě	200 bar

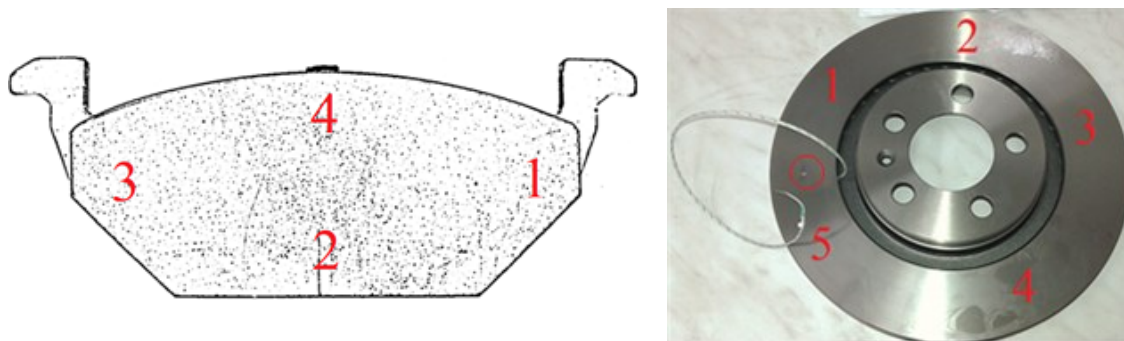
Kromě mechanických setrvačníků je dynamometr Link M2800 schopen rovněž využít výkon pohonného elektromotoru k simulaci setrvačnosti. Je tak možné simulovat spojitě spektrum setrvačností mezi hodnotami mechanických setrvačníků i nad nimi.



Obr. 16. Dynamometr Link M2800 umístěný na CNT VŠB-TUO.

5.2.1. Postup testování

Abychom stanovili opotřebení zkoumaných vzorků, byly jednotlivé brzdové desky a brzdové kotouče zváženy a změřeny vždy před dynamometrickým testem i po něm. Na obrázku 17 jsou znázorněna místa, na kterých byla měřena tloušťka desek a kotoučů.



Obr. 17. Místa měření tloušťky desek (vlevo) a kotoučů (vpravo). Kroužkem vyznačeno místo měření teploty kotouče – termočlánek.

Pro stanovení frikční účinnosti byl zvolen postup dle normy ISO 26867. Jednotlivé sekce s jejich příslušnými parametry jsou vypsány v tabulce 2. U sekcí Fade 1 a 2 je místo brzdného tlaku uvedeno zpomalení.

Tab. 2. Sekce a parametry normy ISO 26867.

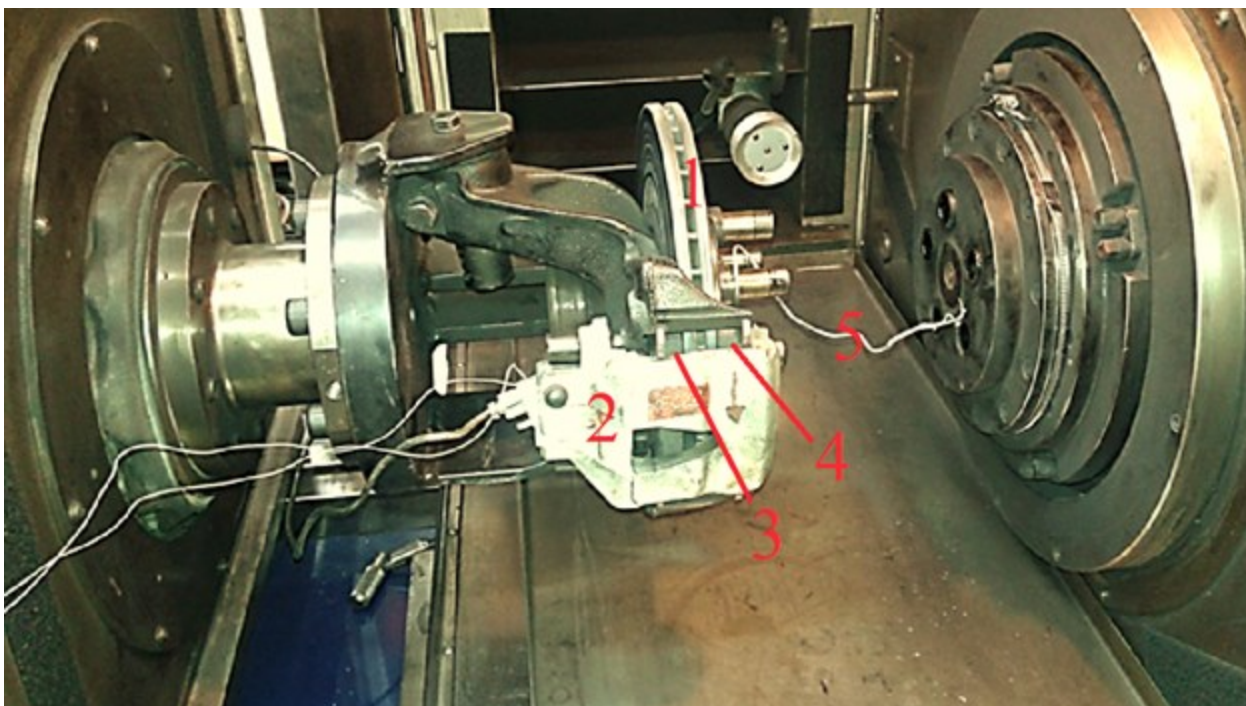
	Název sekce	Počet cyklů	Počáteční teplota kotouče (°C)	Počáteční rychlost (km/h)	Konečná rychlost (km/h)	Brzdný tlak (Mpa)
1	Green Characteristics	10	150	80	30	3
2	Burnish	32	200	80	30	proměnlivý
3	Char. Value	5	150	80	30	3
4	Ramp. Appl.	2	100	50	0	2,5
5	Cold Char.	6	40; 150	80	30	3
6	Low SPD/ Low PRESS	3	150	20	0	1; 2; 3
		3	150	30	0	1; 2; 3
7	PRESS Line	6	150	80	40	1 až 6
8	SPD Line	5	150	rostoucí	rostoucí	3
9	Failed Booster	6	100	100	0	3
10	Motorway Appl.	1	150	100	0	6
		1	150	175	100	3,5
11	Low SPD/ Low PRESS	3	150	20	0	1; 2; 3
		3	150	30	0	1; 2; 3
12	Char. Recovery	10	150	80	30	3
13	Fade 1	15	rostoucí	100	0	a = 0,4 g
14	Hot Perform. 500°C	6	500	80	40	rostoucí
15	Low SPD/ Low PRESS	3	150	20	0	1; 2; 3
		3	150	30	0	1; 2; 3
16	Char. Recovery	10	150	80	30	3
17	PRESS Line	6	150	80	40	1 až 6
18	Fade 2	15	rostoucí	100	0	a = 0,4 g
19	Low SPD/ Low PRESS	3	150	20	0	1; 2; 3
		3	150	30	0	1; 2; 3
20	Final Characteristics	6	150	80	30	3

V první sekci dojde k odstranění nečistot a k vytvoření základní nesouvislé frikční vrstvy, překoná se tak tzv. green fade. Během druhé sekce dojde k vytvoření dokonalého kontaktu mezi deskou a kotoučem, tzn., utvoří se souvislá frikční vrstva. Ve třetí sekci je měřena tzv. charakteristická hodnota, kterou materiál vykazuje za běžných (optimálních) podmínek. Ve čtvrté sekci dochází k postupnému zvyšování tlaku, přičemž s rostoucím tlakem roste i frikční koeficient. V páté sekci se měří charakteristická hodnota za studena (v prvním cyklu sekce při 40 °C, pak opět při 150 °C). Šestá sekce (stejně jako jedenáctá, patnáctá a devatenáctá)

probíhá za nízké rychlosti a nízkého tlaku. Sedmá sekce udává vliv tlaku na hodnotu frikčního koeficientu (stejná je i sedmnáctá sekce). V osmé sekci postupně roste počáteční i konečná rychlost. Devátá sekce simuluje poruchu posilovače brzd. V desáté sekci je simulace pohybu po dálnici. Ve 12. sekci má dojít k ověření frikčního koeficientu při stejných podmínkách jako v sekci třetí (stejná je pak sekce šestnáct). Sekce číslo třináct simuluje vliv rostoucí teploty kotouče na frikční koeficient (fade – při stálé hodnotě zpomalení), stejné podmínky má pak sekce osmnáct. Ve 14. sekci sledujeme chování desek při teplotě 500 °C a rostoucím tlaku. Poslední 20. sekce opět stanovuje charakteristickou hodnotu frikčního koeficientu na konci všech sekcí po ovlivnění desek vysokou teplotou.

5.2.2. Příprava měření

Před měřením frikční účinnosti na dynamometru byly, jak již bylo zmíněno, naměřeny výchozí hodnoty hmotnosti a tloušťky desek. Připravené litinové brzdové kotouče byly provrtány a osazeny kontaktními termočlánci, jak je také možno vidět na obrázku 17 vpravo. Testovaná dvojice desek (IN a OUT – vnitřní a vnější) byla osazena do brzdového třmenu a nasazena na držák třmenu. Celou připravenou sestavu můžeme vidět na obrázku 18.



Obr. 18. Testovací komora s nainstalovaným brzdovým systémem. 1 – kotouč, 2 – třmen, 3 – deska IN, 4 – deska OUT, 5 – termočlánek.

5.2.3. Výsledky dynamometrických zkoušek

Každý vzorek prošel kompletním testováním dle normy ISO 26867, v této práci provedeme vyhodnocení pouze sekce 18 – Fade 2. Sekce simulující fade byla vybrána, protože je v ní nejvíce patrný vliv vysoké teploty na frikční koeficient. Sekce Fade 2 je důležitější než sekce Fade 1, protože je v ní materiál již plně tepelně stabilizovaný. V této sekci dochází s každým dalším cyklem ke zvýšení počáteční teploty a sleduje se průběh hodnoty frikčního koeficientu. Pro materiály užívané do automobilových brzdných systémů je optimální hodnota $\mu = 0,4$ (vyznačeno v grafech zeleně). Při nižších hodnotách je intenzita brzdění nedostatečná, při hodnotách vyšších již dochází k neúměrnému zvýšení opotřebení.

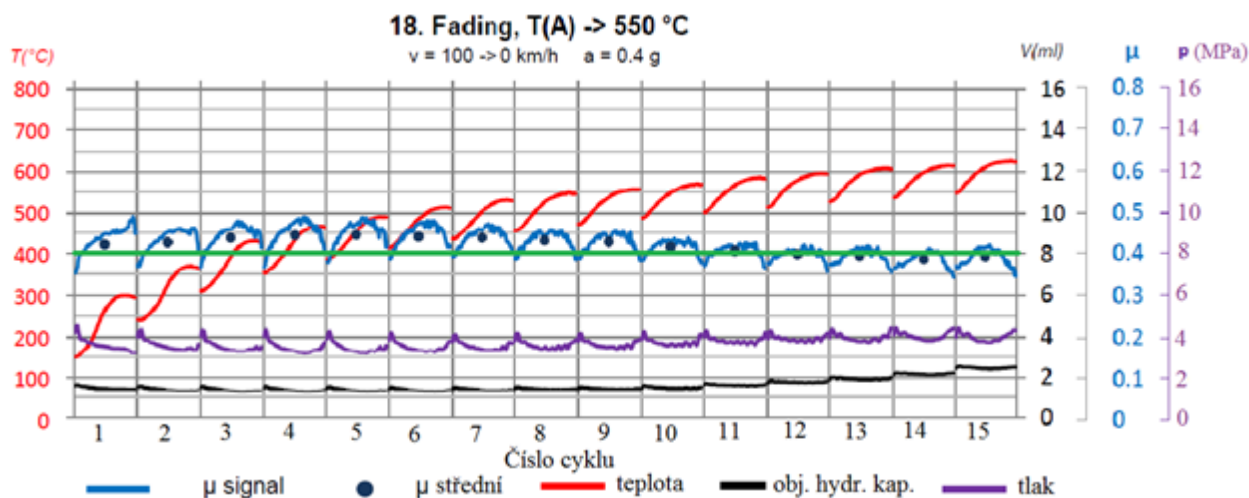
Vzorek A

Na snímcích pořízených po frikčních testech (viz obrázek 19), můžeme vidět frikční vrstvu vytvořenou na větší části frikčního povrchu obou desek. Malá část materiálu je zachycena rovněž na protikusu (kotouči), viditelné jsou také drážky po abrazivních částicích.



Obr. 19. Desky a kotouč po testování, vzorek A.

Frikční vrstva u kompozitního materiálu vzorku A byla velice stabilní, což ovšem není zcela žádoucí. V ideálním případě by se měla více obnovovat odtrháváním materiálu z povrchu desky. Kotouč na obrázku 19 je focen ze strany desky OUT, stejně jako u vzorků B a C.



Obr. 20. Vybrané sekce procedury ISO 26867 – 18 – vzorek A.

Vzorek A vykazoval stabilní a dostatečně vysoký frikční koeficient (viz obr. 20). S rostoucí teplotou klesá od hodnoty 0,45 k hodnotě 0,40. V prvních dvou cyklech dochází pouze k růstu frikčního koeficientu, v dalších již k růstu, dosažení maxima a následnému poklesu. Průběh frikčního koeficientu je v cyklech uprostřed sekce poměrně pozvolný, v posledních cyklech je pak přechod razantnější. Aplikovaný tlak přitom v jednotlivých cyklech klesá, dosáhne minima a na konci mírně roste.

Vzorek B

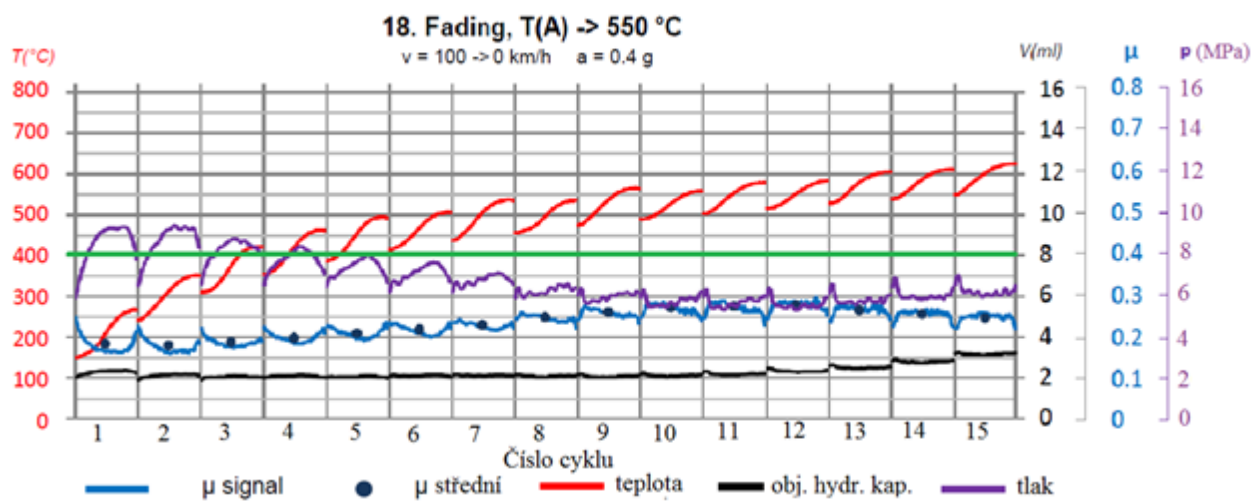
Tmavě hnědé oblasti na obrázku 21 představují velké množství prachu zachyceného na povrchu desky. Mimo to je také vidět frikční vrstva vytvořená na větší části frikčního povrchu. Na kotouči se zachytilo větší množství materiálu z desek. Frikční vrstva v případě desek vzorku B byla opět velmi stabilní a nedocházelo tak k její žádoucí obnově. K zachycení velkého množství materiálu na kotouči došlo pravděpodobně v průběhu sekce Fade 1, kdy došlo k významnému poklesu frikčního koeficientu až na úroveň přibližně 0,2. V žádné z následujících sekcí již frikční koeficient nepřekročil hodnotu 0,35.

Právě materiál zachycený na brzdovém kotouči je pravděpodobně nejvýznamnějším důvodem toho, že byl frikční koeficient v tomto testu tak nízký. Kvůli tomuto materiálu nebyl

vlastně frikční kompozit vzorku B v kontaktu s litinovým kotoučem, ale opět s vrstvou materiálu vzorku B. Odštípnutí materiálu na desce OUT mohlo být způsobeno působením vysokého tlaku a teploty v sekci Fade 2 (viz níže), kdy aplikovaný tlak dosáhl až 9,5 MPa.



Obr. 21. Desky a kotouč po testování, vzorek B.

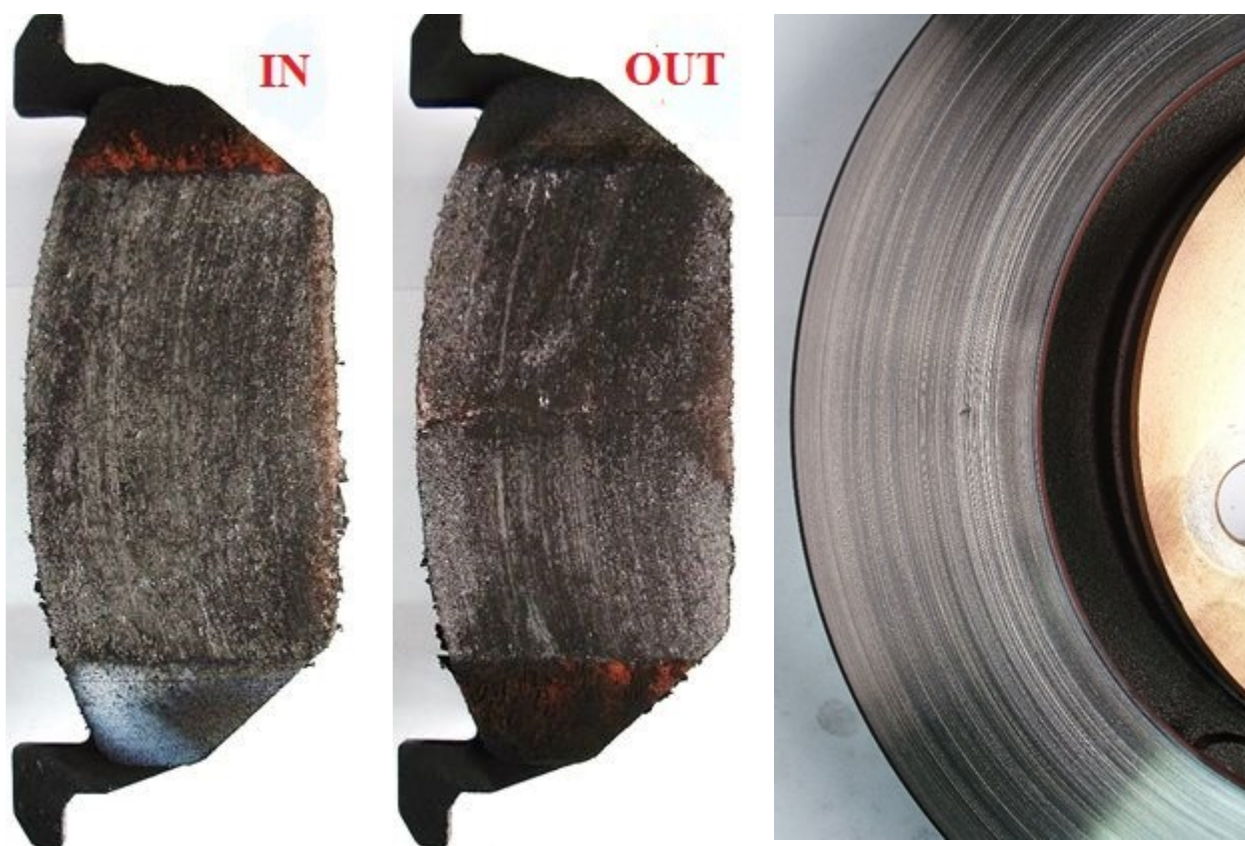


Obr. 22. Vybrané sekce procedury ISO 26867 – 18 – vzorek B.

Vzorek B (viz obrázek 22) při tomto testování vykazoval úplně opačné trendy, než tomu bylo u vzorku A (a také C, viz dále). V jednotlivých cyklech, po aplikaci brzdného tlaku, frikční koeficient klesal, před koncem cyklu pak rostl. Aplikovaný tlak přitom musel být mnohem vyšší než u vzorku A (až 9,5 MPa), přičemž jeho průběh byl nejprve rostoucí, pak klesající (opačně než u A). Frikční koeficient se pohyboval v rozmezí 0,18 až 0,28, tedy hluboko pod optimální úrovní 0,4.

Vzorek C

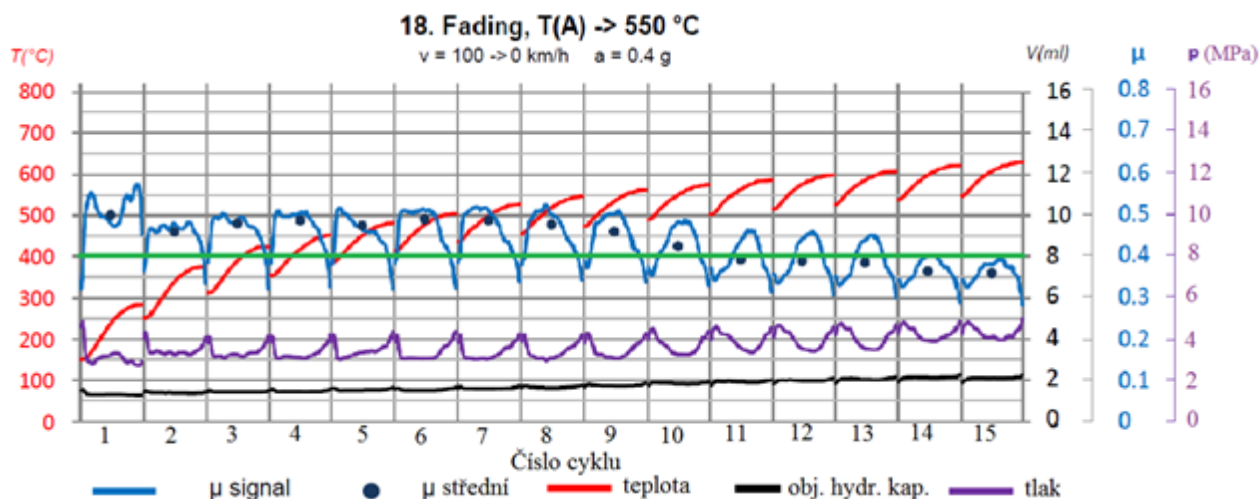
Testování vzorku C proběhlo standardně, jen deska OUT uprostřed praskla (obr. 23), což mohlo být způsobeno únavou, či konstrukční chybou (deska IN byla také naprasklá). Na kotouči jsou opět patrné drážky po abrazivních částicích, nejsou ale příliš hluboké. Vzorek C ukazuje, jak by se měl správně frikční kompozit při těchto testech chovat.



Obr. 23. Desky a kotouč po testování, vzorek C.

Frikční koeficient vzorku C (obrázek 24) klesal s rostoucí teplotou od hodnoty 0,50 k hodnotě 0,36. Kromě prvního cyklu této sekce ve všech následujících cyklech frikční koeficient

nejprve rostl, a pak klesal. Aplikovaný tlak na začátku cyklu klesal, na konci rostl. S rostoucí teplotou ke konci sekce musel být aplikovaný brzdný tlak zvyšován.



Obr. 24. Vybrané sekce procedury ISO 26867 – 18 – vzorek C.

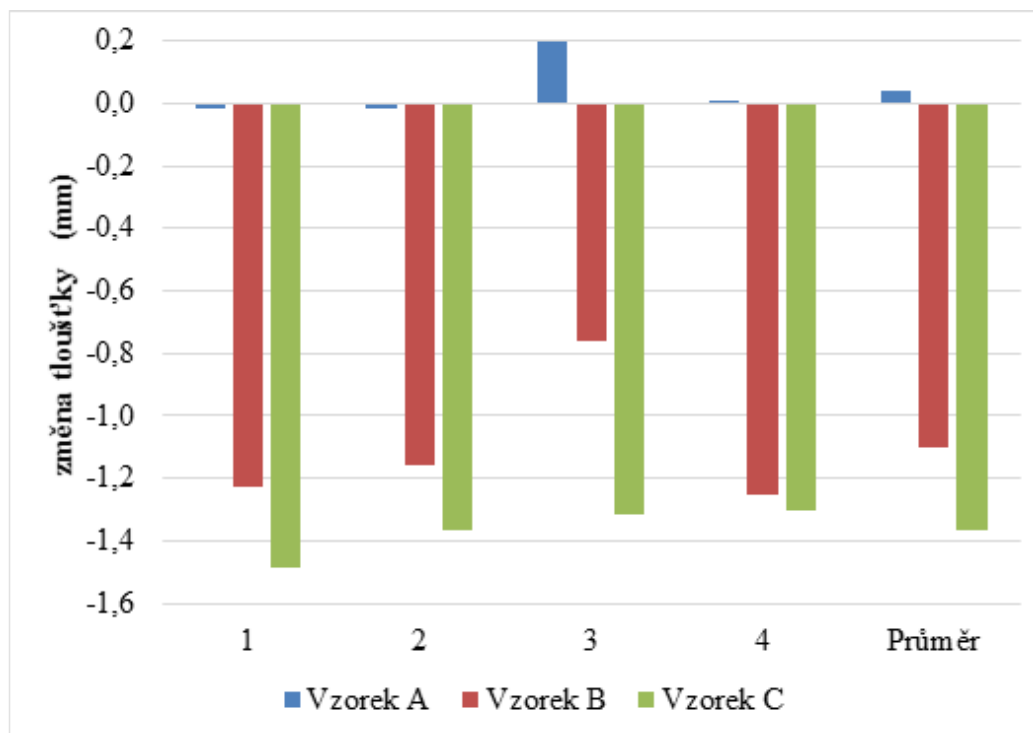
Opotřebení vzorků frikčních materiálů

Díky porovnání hodnot tloušťky a hmotnosti naměřených před a po dynamometrických zkouškách jsme mohli vyhodnotit opotřebení jednotlivých vzorků.

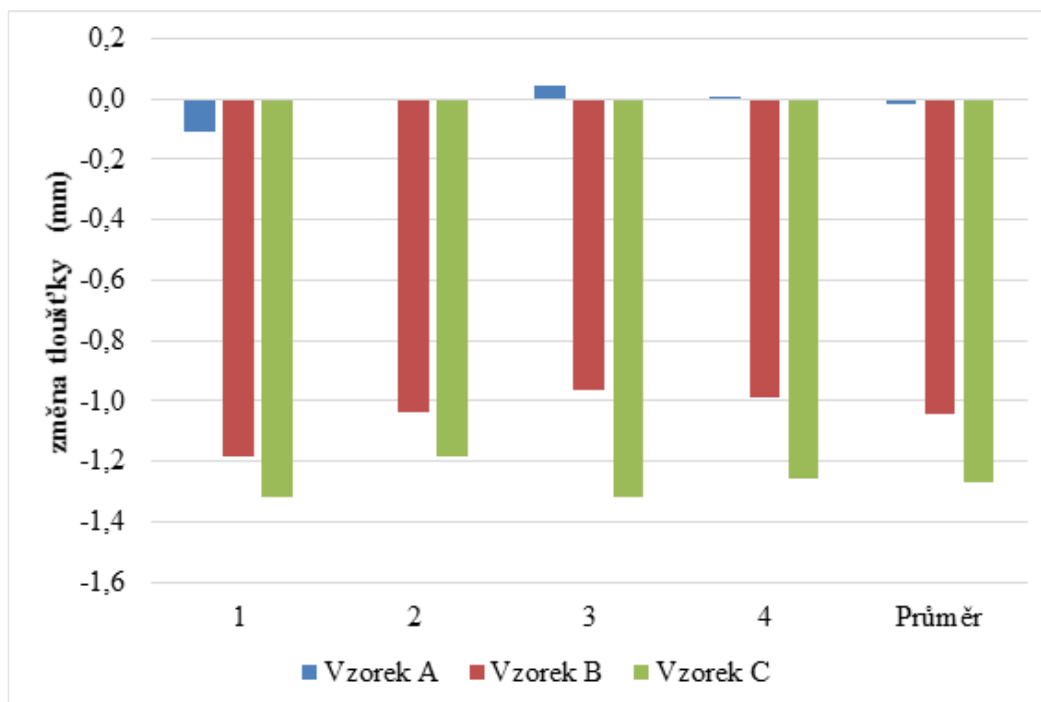
U vzorku A je z grafů (obr. 25 a 26) patrné, že k žádnému znatelnému úbytku tloušťky nedošlo, lokální výkyv v místě měření 3 dokonce naznačuje přírůstek. Z hlediska směru otáčení desek se však nejedná o stejné místo, na desce IN jde o přední hranu desky, u desky OUT o zadní. Tento přírůstek mohl být způsoben výstupkem nataveného a utužlého materiálu frikční vrstvy a vysokým tepelným namáháním na styku kotouče a brzdové desky. V případě vzorku B se jak deska IN, tak i deska OUT ztenčily v průměru o 1 mm. Vzorek C vykázal největší průměrný úbytek tloušťky desek IN i OUT – 1,4 respektive 1,3 mm.

Tloušťka kotouče (viz obr. 27) se u vzorku A prakticky nezměnila. Úbytek hmotnosti (obr. 28) je u desky IN, desky OUT i kotouče znatelný, konkrétně šlo o úbytek 5,7 g, 6,2 g a 4,2 g. Kotouč vzorku B se po celém obvodu rozšířil téměř o 0,09 mm. To bylo způsobeno zachycením většího množství materiálu frikční vrstvy na kotouči, jak bylo patrné na obrázku 21. U brzdových desek vzorku B byl zaznamenán největší úbytek hmotnosti, ztratily 21,3 g (IN) a 20,4 g (OUT). Naopak na kotouči přibyl materiál – přírůstek činil 7,9 g. Kotouč vzorku C se co

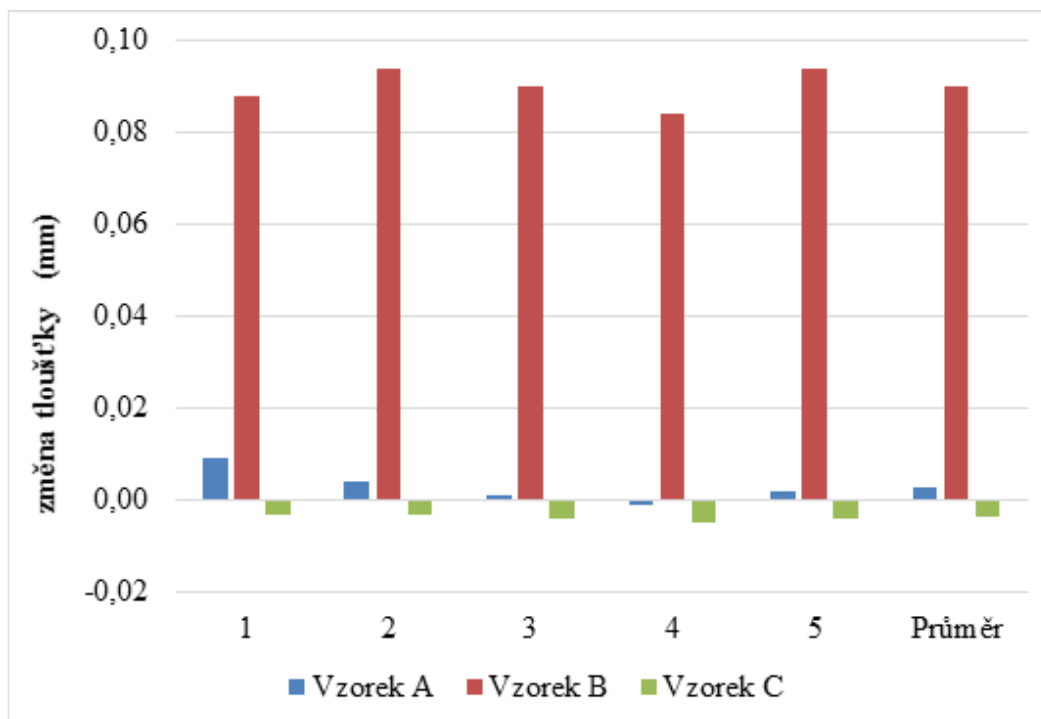
do tloušťky prakticky nezměnil. Úbytek hmotnosti desek činil 16,9 a 15,3 g (IN, OUT). Na kotouči ubylo 6,1 g materiálu.



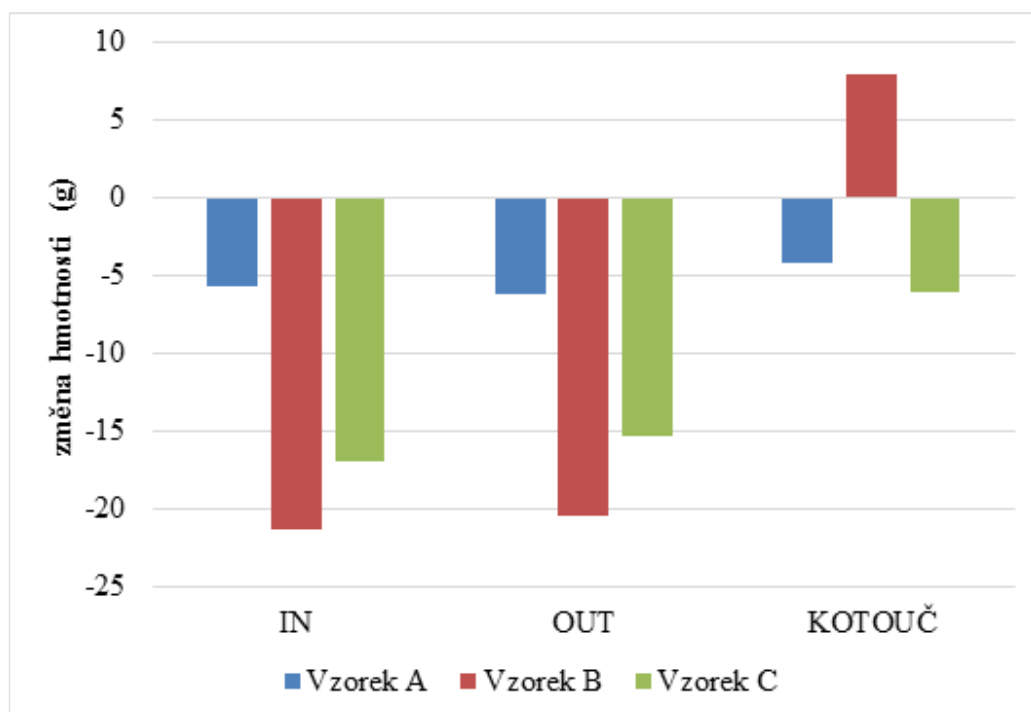
Obr. 25. Změna tloušťky desek IN.



Obr. 26. Změna tloušťky desek OUT.



Obr. 27. Změna tloušťky kotoučů.



Obr. 28. Změna hmotnosti desek a kotoučů.

5.2.4. Zhodnocení dynamometrických zkoušek

Srovnáme-li vzorky A a B, můžeme říci, že vzorek A dopadl v dynamometrických testech daleko lépe, než vzorek B. Srovnání průměrných frikčních koeficientů je následující: u vzorku A to bylo cca. 0,42, u vzorku B pak 0,23. V porovnání se vzorkem C ($\mu \sim 0,45$) dopadl vzorek A srovnatelně dobře. Kromě dobré úrovně frikčního koeficientu vykazoval rovněž podobné charakteristiky ve většině procedur testování normou ISO 26867. Za jistých okolností by tedy bylo možné vzorek A aplikovat i u osobních automobilů.

Naproti tomu vzorek B, kromě nízkého frikčního koeficientu, vykazoval chování velice odlišné od zbylých dvou testovaných vzorků. Jeho frikční účinnost v rámci jednoho cyklu v čase a s rostoucí teplotou klesala, u ostatních vzorků rostla. V sekci simulující fade musel systém aplikovat daleko větší brzdny tlak, aby dosáhl požadovaného brzdneho účinku. S rostoucí teplotou při jednotlivých cyklech v této sekci též frikční koeficient rostl, přičemž u zbylých vzorků klesal.

Z měření opotřebení vzorků vyplývá, že desky vzorku A prakticky neztratily na tloušťce, což lze vysvětlit nataveným a utuhlým materiálem frikční vrstvy. Přesto však došlo k úbytku okolo 6 g u každé desky. Kotouč jen nepatrně zvětšil svou tloušťku, ztráta hmotnosti však činila přibližně 4 g, což lze připsat opět vzniklým oxidickým fázím.

Desky vzorku B ztratily mnohem více tloušťky – přes 1 mm každá, stále to však bylo méně, než u komerčního vzorku C – ten ztratil cca. 1,3 mm u obou desek. Ztráta hmotnosti byla u vzorku B největší ze všech – přes 20 g na desku, oproti ~15 g u vzorku C. Kotouč příslušný ke vzorku B, na rozdíl od ostatních, zaznamenal přírůstek tloušťky (0,09 mm) i hmotnosti (7,9 g). To dokládá i vizuální pohled na kotouč, kdy bylo viditelné velké množství materiálu frikční vrstvy zachyceno na jeho povrchu. Kotouč vzorku C prakticky nezaznamenal změnu tloušťky, ztratil pak 6 g hmotnosti.

Celkově vzato, materiál vzorku A dokáže podávat, při testování dle normy ISO 26867, podobné výkony jako komerčně dostupný vzorek C, který je přímo určen pro použití v osobních automobilech. Materiál vzorku B je patrně nevhodný k použití v páru s litinovým kotoučem, na kterém docházelo k usazování frikčního materiálu z brzdových desek. Ani vzorek A ani B

nebyly k těmto aplikacím určeny a mají své zamýšlené pomaloběžné průmyslové aplikace, ve kterých pracují při nižších otáčkách, ač s vyšším brzdícím momentem.

Vyhodnocení opotřebení z našich měření je spíše orientační, jelikož byly vzorky v rámci testování dle normy ISO 26867 podrobeny pouze 167 brzdícím cyklům. Pokud bychom chtěli opravdu relevantní data o dlouhodobém opotřebení, museli bychom použít testovací proceduru dle normy SAE J2707, která zahrnuje řádově více testovacích cyklů a je ke stanovení opotřebení přímo určena.

5.3. Strukturní a fázová analýza

Vzorky A a B byly dále analyzovány několika metodami, a to jak ve stavu výchozím, tak i po dynamometrickém testování. Vzorek C není možné pro jeho zcela odlišnou povahu srovnat s ostatními vzorky, co se týče složení, můžeme však srovnat vznikající ořetrové částice. Ořetrové částice mají nezanedbatelný dopad na životní prostředí, a proto jim musí být věnována pozornost.

Povrch byl zkoumán na optickém i elektronovém mikroskopu. Na SEM byly dále studovány i ořetrové částice a řezy materiálem, které reprezentují objemovou analýzu materiálů. Velikostní rozdělení ořetrových částic bylo stanoveno na laserovém analyzátoru. Dále byly provedeny prvkové analýzy pomocí EDX a XRFS. Ramanovou spektroskopií byly stanoveny majoritně zastoupené sloučeniny.

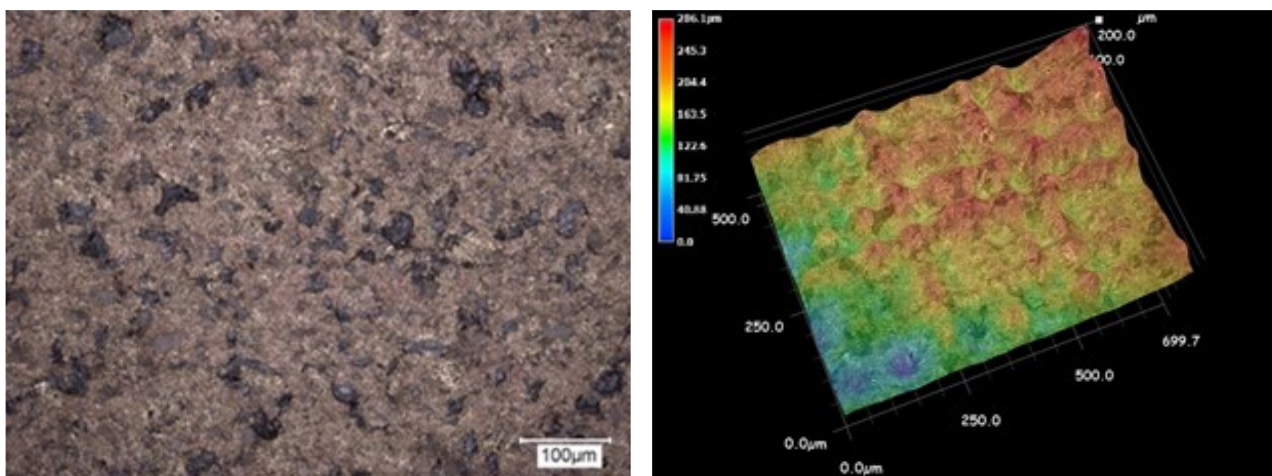
5.3.1. Optická mikroskopie

Měření bylo provedeno na digitálním optickém mikroskopu VHX-500 (Keyence Corporation, Japonsko), umístěném na Centru nanotechnologií VŠB-TUO. Tento mikroskop je schopen digitálně složit několik snímků do jednoho. Může tak vždy zaostřit na danou vzdálenost (danou „vrstvou“) a složený snímek je pak zaostřen po celém výškovém profilu. Tento výškový profil je rovněž schopen vykreslit do trojrozměrného modelu.

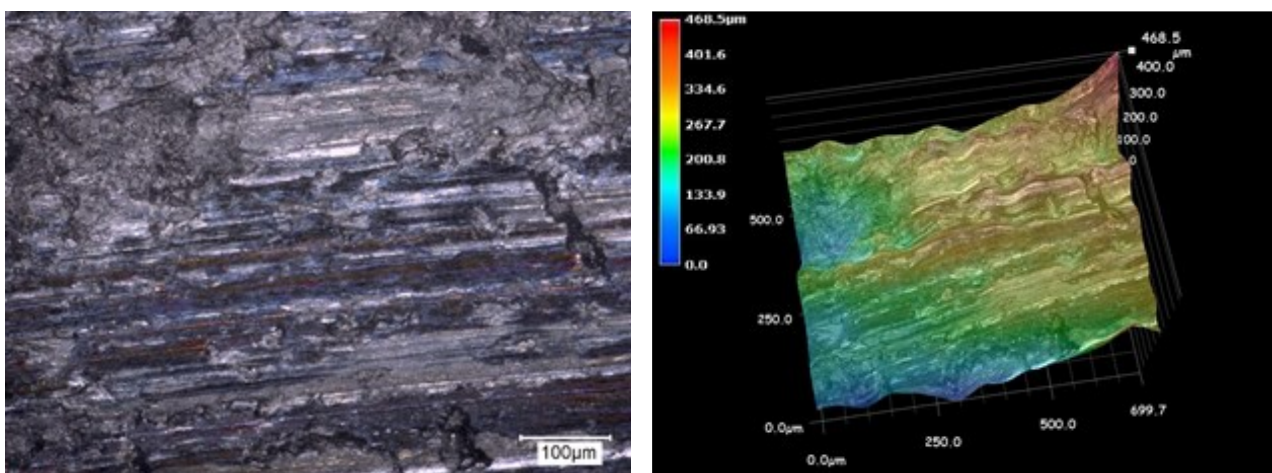
Vzorek A

Obrázek 29 ukazuje výchozí stav povrchu vzorku A. Výškový rozdíl mezi pravým horním rohem a levým dolním rohem je dán nedokonale ustaveným vzorkem. Na obrázku 30 je povrch po dynamometrických testech. Je na něm možné vidět frikční vrstvu a v ní jednotlivé stopy

po abrazivních částicích, dále také důlky, ze kterých byl materiál vytržen adhezivně. Tyto důlky lze vidět také na 3D mapě, kde jsou znázorněny modrou barvou.



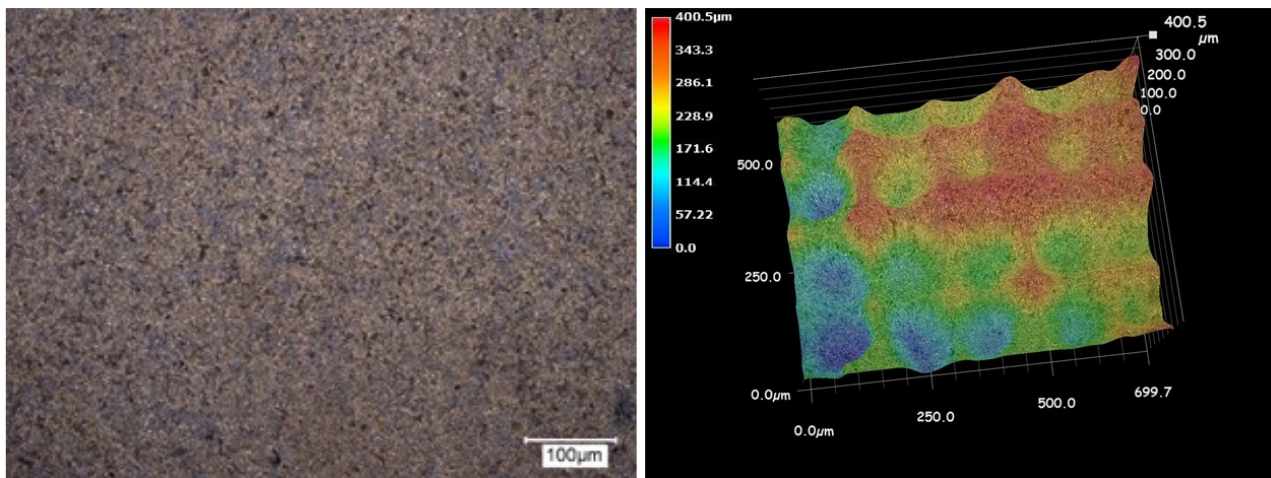
Obr. 29. Povrch vzorku A ve výchozím stavu. Vlevo mikrostruktura povrchu, vpravo 3D mapa.



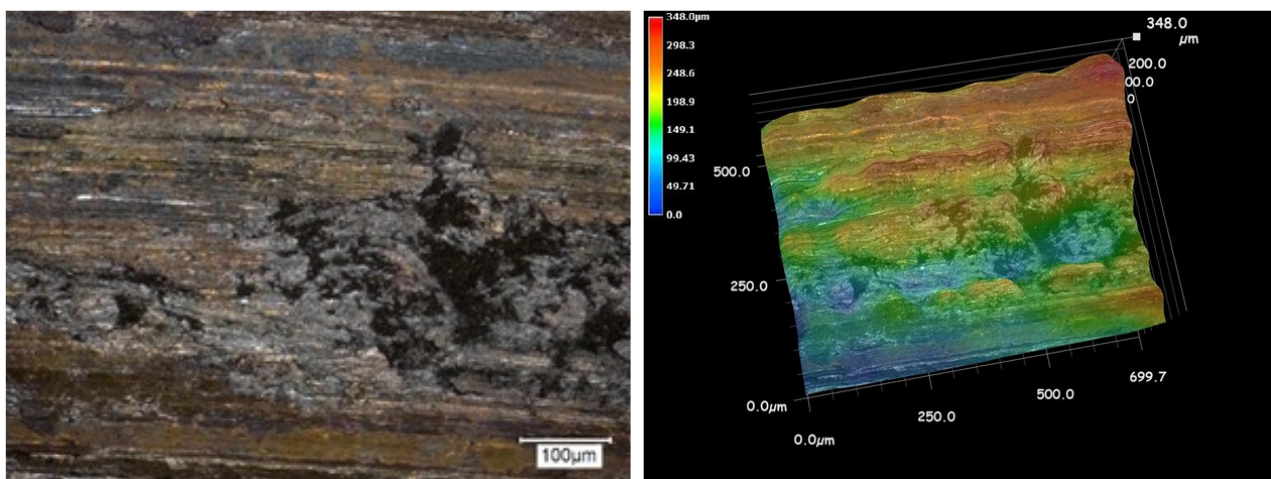
Obr. 30. Povrch vzorku A po brzdění. Vlevo mikrostruktura povrchu, vpravo 3D mapa.

Vzorek B

Na obrázku 31 můžeme vidět mikrostrukturu povrchu vzorku B, která je mnohem více jemnozrnná, než tomu bylo u vzorku A. Na snímku po dynamometrických zkouškách (obr. 32) lze opět pozorovat drážky ve frikční vrstvě, způsobené tvrdými abrazivními částicemi. Adhezi vytržený materiál rovněž potvrzuje i trojrozměrná mapa vpravo.



Obr. 31. Povrch vzorku B ve výchozím stavu. Vlevo mikrostruktura povrchu, vpravo 3D mapa.



Obr. 32. Povrch vzorku B po brzdění. Vlevo mikrostruktura povrchu, vpravo 3D mapa.

5.3.2. SEM-EDX analýza

Měření proběhlo na skenovacím elektronovém mikroskopu FEI QUANTA FEG 450 vybaveným emisním zdrojem (*field emission gun*). Tento přístroj je umístěn v budově Podnikatelského inkubátoru (PI) v areálu VŠB-TUO. Detekci signálu zajišťuje detektor sekundárních elektronů (SE) a zpětně odražených elektronů (BSE). Mikroskop je dále vybaven EDX analyzátozem EDAX Apollo X. Měřeno bylo při urychlovacím napětí 15 kV a šířce svazku 5 μm.

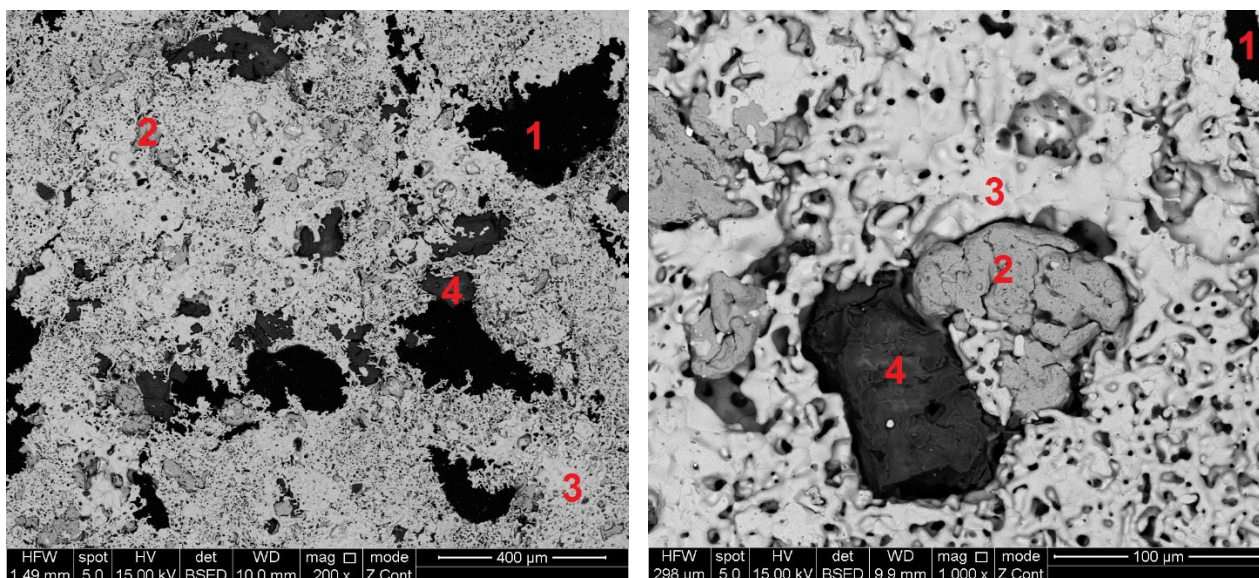
U všech studovaných vzorků byla provedena plošná (z plochy 1 mm²) i bodová analýza EDX. Byly provedeny analýzy povrchu ve výchozím stavu i po dynamometrických testech. Dále

byla provedena objemová analýza výbrusů. Otěrové částice byly podrobeny EDX analýze a měření rozdělení velikosti částic.

Vzorky povrchu (před brzděním ani po něm) nebyly nijak upraveny, pouze byly strženy z nosného plechu, abychom zachovali maximální možnou velikost vzorku. Vzorky pro studium řezu materiálem byly nařezány, zality do pryskyřice a leštěny. Velikostní rozdělení otěrových částic bylo změřeno na laserovém analyzátoru velikosti částic Mastersizer 3000 (Malvern Instruments).

Vzorek A – povrch

Na obrázku 33 lze vidět mikrostrukturu povrchu vzorku A. Jednotlivé bodové analýzy jsou uvedeny v tabulce 3.



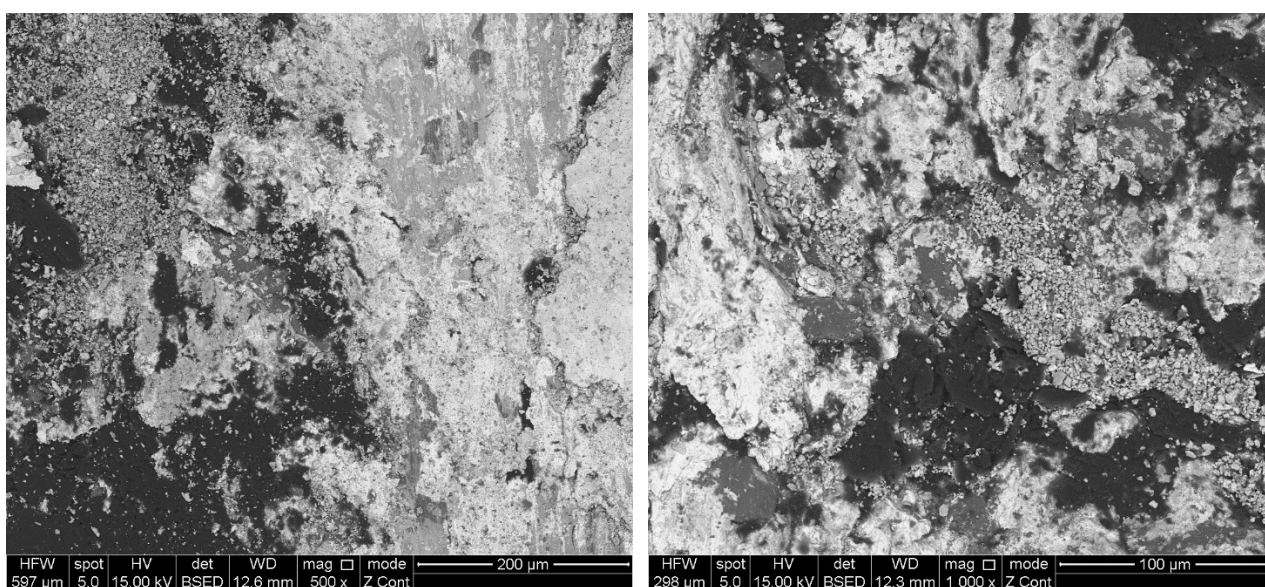
Obr. 33. Povrch vzorku A ve výchozím stavu. Vyznačena místa EDX analýzy.

Tab. 3. EDX analýza vzorku A ve výchozím stavu.

	C _K	O _K	Al _K	Si _K	K _K	Sn _L	Fe _K	Cu _K
	(hm. %)							
Plocha	23,6	2,2	2,7	0,6	-	3,7	3,8	63,3
1	93,5	4,9	0,1	0,1	-	-	0,1	1,3
2	2,9	2,1	1,4	0,4	-	0,4	91,1	1,8
3	0,6	0,4	0,2	0,2	-	9,5	2,7	86,4
4	2,3	40,3	40,9	14,6	0,6	0,2	0,3	0,8

Plošná analýza potvrzuje majoritní zastoupení mědi. Obsah uhlíku je v případě EDX analýzy zpravidla nadhodnocen. V místě měření 1 se jedná o grafit, tvořící převážně větší částice (až 400 μm), přibližně kulovité částice 2 představují železo. Matricí je zde bronz Cu-Sn (bod 3), vyznačující se houbovitou strukturou. Poslední stanovenou složkou (místo 4) je Al-Si-O (syntetický mullit).

V případě měření vzorků po dynamometrických testech byla struktura povrchu značně nehomogenní. Místa měření byla proto vybrána náhodně. Z obr. 34 je patrné, že se na povrchu nachází velké množství ořetrových částic různé velikosti.



Obr. 34 Povrch vzorku A po dynamometrickém testování.

Tab. 4 EDX analýza vzorku A ve stavu po dynamometrických testech.

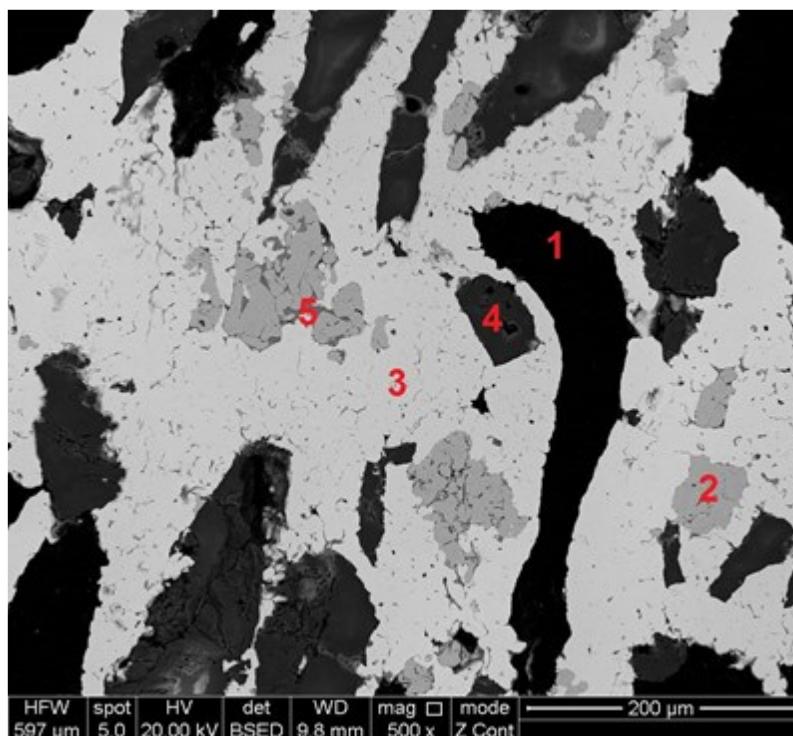
	C _K	O _K	Al _K	Si _K	Sn _L	Fe _K	Cu _K
	(hm. %)						
Plocha	41,1	9,7	3,6	1,0	3,3	7,6	33,8
1	13,4	0,6	0,3	0,2	2,4	49,1	34,0
2	13,1	1,8	0,3	0,1	8,0	1,6	75,1
3	17,9	11,0	0,4	0,2	28,3	1,3	40,9
4	3,9	5,1	0,5	0,2	-	1,3	89,0
5	11,9	13,8	0,2	-	-	69,4	4,8
6	1,5	7,4	1,8	0,9	5,2	18,1	65,1
7	5,9	6,8	17,1	3,0	2,3	19,5	45,4
8	10,2	18,8	8,3	2,3	-	52,9	7,6

Plošná analýza (tab. 4) naznačuje zvýšení podílu kyslíku a tudíž i vznik oxidických fází. Zvýšení obsahu železa bylo způsobeno kontaktem s litinovým kotoučem, jehož částice spoluvytvářejí frikční vrstvu.

Indexy K, L a M v záhlaví tabulek s EDX analýzami odpovídají energetickým hladinám v elektronovém obalu atomů. Tyto energetické hladiny jsou pro jednotlivé prvky charakteristické.

Vzorek A – výbrus

Obrázek 35 znázorňuje snímek výbrusu vzorku A. EDX analýza je shrnuta v tabulce 5.



Obr. 35. Výbrus vzorku A s vyznačenými místy EDX analýzy.

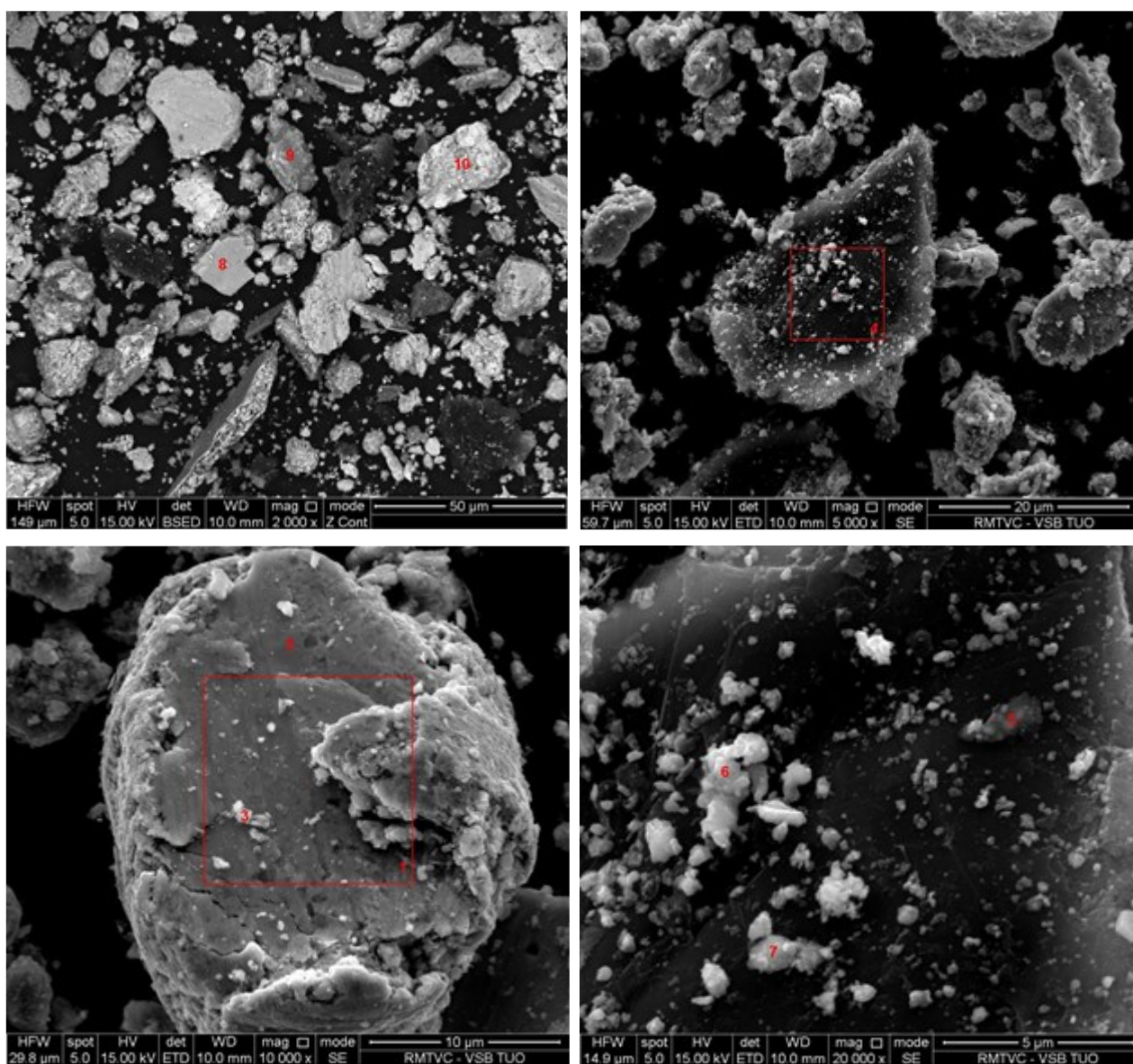
Tab. 5. EDX analýza výbrusu vzorku A.

	C _K	O _K	Al _K	Si _K	K _K	Sn _L	Fe _K	Cu _K
	(hm.%)							
Plocha	38,0	6,8	5,6	1,1	-	3,1	7,0	38,4
1	92,7	4,8	0,1	0,1	-	0,1	1,3	1,0
2	2,2	1,7	0,1	0,1	-	0,4	93,3	2,3
3	1,8	0,4	0,1	0,1	-	8,5	0,7	88,4
4	2,8	37,0	42,8	15,5	0,7	0,2	0,3	0,8
5	3,3	31,6	0,2	0,2	0,3	1,1	51,9	11,6

Plošná EDX analýza opět potvrzuje majoritní zastoupení mědi a uhlíku. První stanovenou fází je grafit, dále železo, bronz (Cu-Sn) a syntetický mullit (Al-Si-O). V případě poslední fáze $\text{Fe}(\text{Cu})_x\text{O}_y$ se jedná o vrstvu rzi z přípravy, kdy nebyl vzorek správně vysušen, není to tedy fáze původně ve vzorku obsažená.

Vzorek A – otěrové částice

Na obrázku 36 je možné vidět otěrové částice od největších, které mají až 50 μm , až po ty nejmenší, dosahující jen několik desítek nanometrů. Tabulka 6 obsahuje data získaná z EDX analýzy otěrových částic.

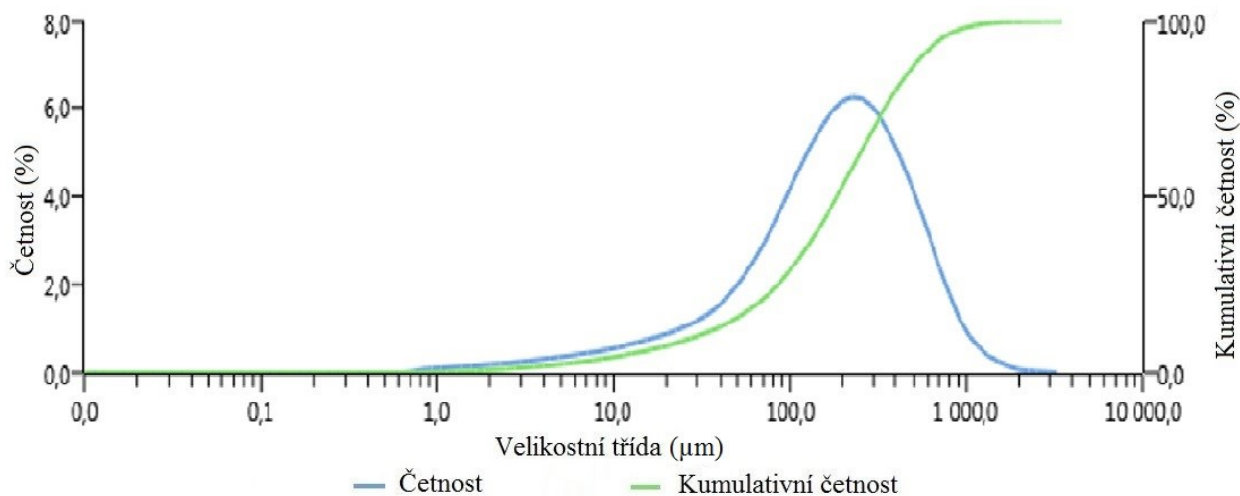


Obr. 36. SEM snímky otěrových částic vzorku A s vyznačenými místy EDX analýzy.

Tab. 6. EDX analýza otěrových částic vzorku A.

	C _K	O _K	Al _K	Si _K	Sn _L	Fe _K	Cu _K
	(hm. %)						
Plocha	27,2	10,4	1,3	0,8	2,4	23,4	34,5
1	2,9	10,0	2,3	0,9	3,9	16,9	63,2
2	1,5	15,0	2,1	1,0	3,5	15,6	61,2
3	10,3	9,8	1,2	1,9	1,9	50,3	24,7
4	80,8	6,7	0,3	0,3	0,5	5,5	5,9
5	92,7	4,6	0,1	0,1	0,1	0,9	1,5
6	-	31,9	25,0	8,5	3,2	5,8	25,8
7	-	15,4	1,2	2,1	1,0	74,2	6,1
8	4,3	12,1	2,0	2,0	3,7	65,9	10,1
9	24,1	9,9	0,4	1,5	1,8	39,4	22,9
10	10,7	12,6	4,1	1,5	3,6	15,9	51,6

Plošná analýza zahrnuje různé typy částic, následuje 1) částice oxidu Cu-Fe-Sn (otěr z matrice), 2) oxid Cu-Fe-Sn (otěr z matrice), 3) oxid Fe-Cu-Sn na povrchu Cu-Fe-Sn-O částice, 4) grafitová částice s drobnými částečkami na povrchu, 5) drobná grafitová částice na povrchu větší grafitové částice, 6) částice Al-Si-O + Cu-O na povrchu grafitové částice, 7) částice Fe-O na povrchu grafitové částice, 8) částice Fe-O, 9) částice Fe-Cu-C-O a 10) částice Cu-Fe-C-O.

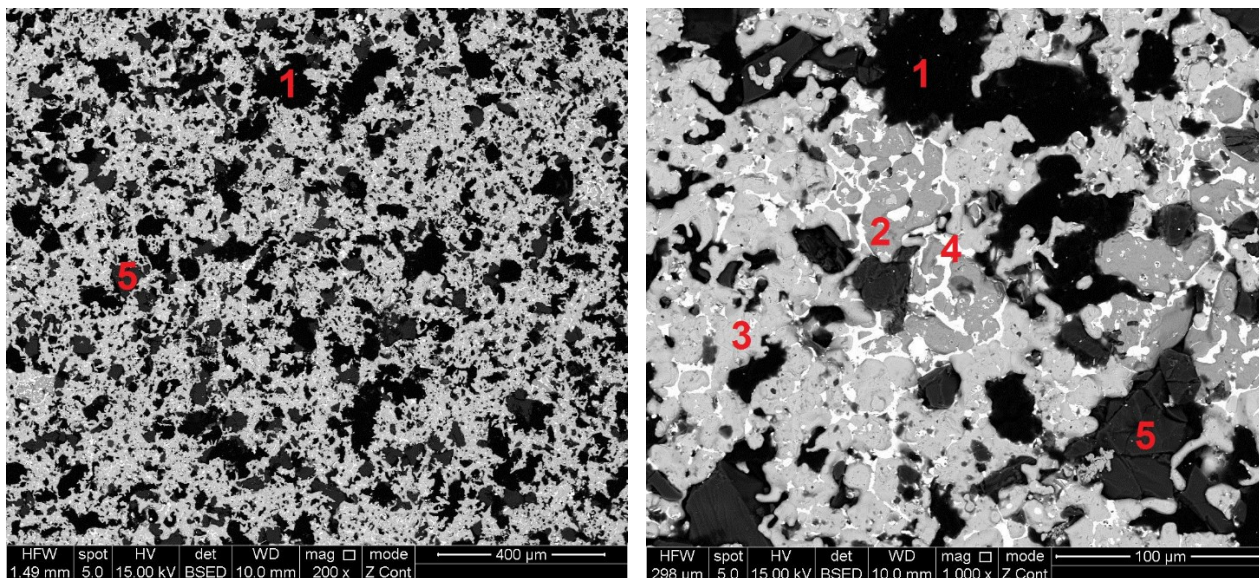


Obr. 37. Velikostní rozdělení otěrových částic – vzorek A.

Velikostní rozdělení ukazuje, že největší podíl (cca. 6,5 %) částic odpovídá velikosti 200 μm. Pod velikostí 20 μm se podíl částic rychle zmenšuje. Největší částice mají cca. 2 mm.

Vzorek B – povrch

Z obrázku 38 je patrné, že vzorek B má daleko jemnější strukturu než vzorek A. V tabulce 7 je shrnuta EDX analýza vzorku B ve výchozím stavu.



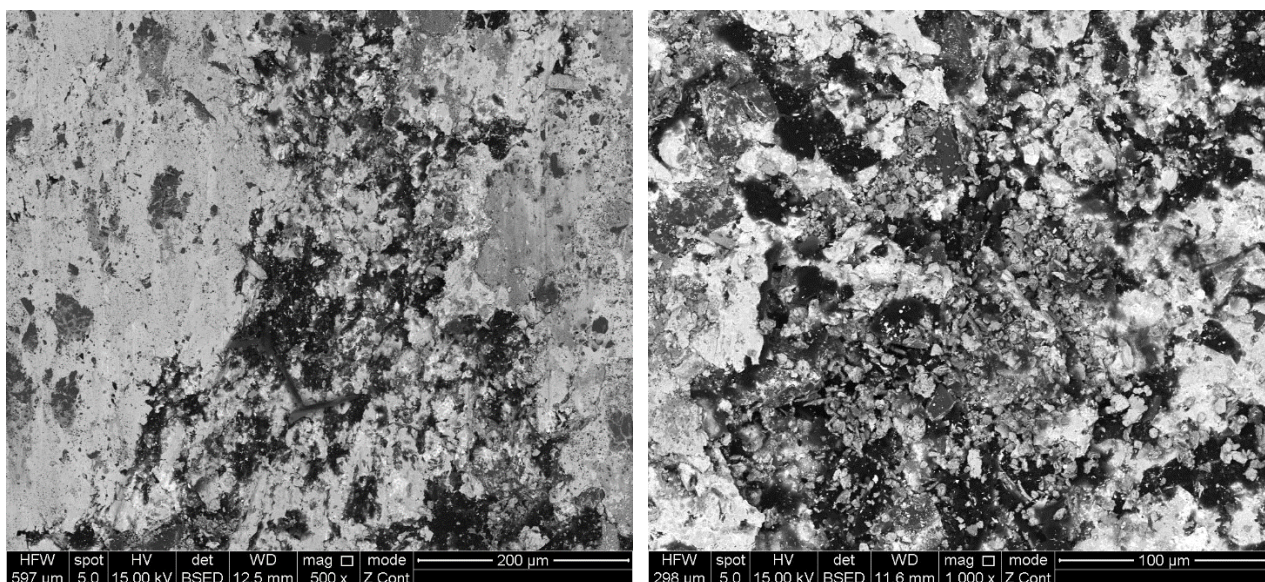
Obr. 38. Povrch vzorku B ve výchozím stavu. Vyznačena místa EDX analýzy.

Tab. 7. EDX analýza vzorku B ve výchozím stavu.

	C _K	O _K	Na _K	Al _K	Si _K	Pb _M	Bi _M	K _K	Sn _L	Fe _K	Cu _K
	(hm. %)										
Plocha	39,4	5,6	-	0,4	5,6	4,7	0,2	0,1	4,1	1,0	39,0
1	93,5	4,5	-	0,1	0,1	0,3	-	0,1	0,1	0,1	1,2
2	1,7	1,3	-	0,1	0,1	0,3	-	-	0,3	95,5	0,8
3	1,2	0,5	0,2	0,1	0,3	0,4	-	-	11,0	0,6	85,7
4	2,9	3,0	0,1	0,2	0,4	83,4	0,7	-	-	5,3	4,0
5	4,4	39,5	0,1	0,3	51,1	1,5	0,2	0,2	0,6	0,2	1,9

Plošná analýza udává opět majoritní podíl mědi a uhlíku, ale také výrazně větší podíl olova, které je užíváno jako mazivo a pro zvýšení pevnosti kompozitu. První stanovenou fází je grafit, dále následuje železo, Cu-Sn (bronz), Pb(-Fe-Cu-Bi) a SiO₂/SiC.

Analýza vzorku B po dynamometrickém testování proběhla obdobně jako u vzorku A. Materiál je opět silně nehomogenní, viz obr. 39. Patrné je také velké množství zachycených otěrových částic.



Obr. 39 Povrch vzorku B po dynamometrickém testování.

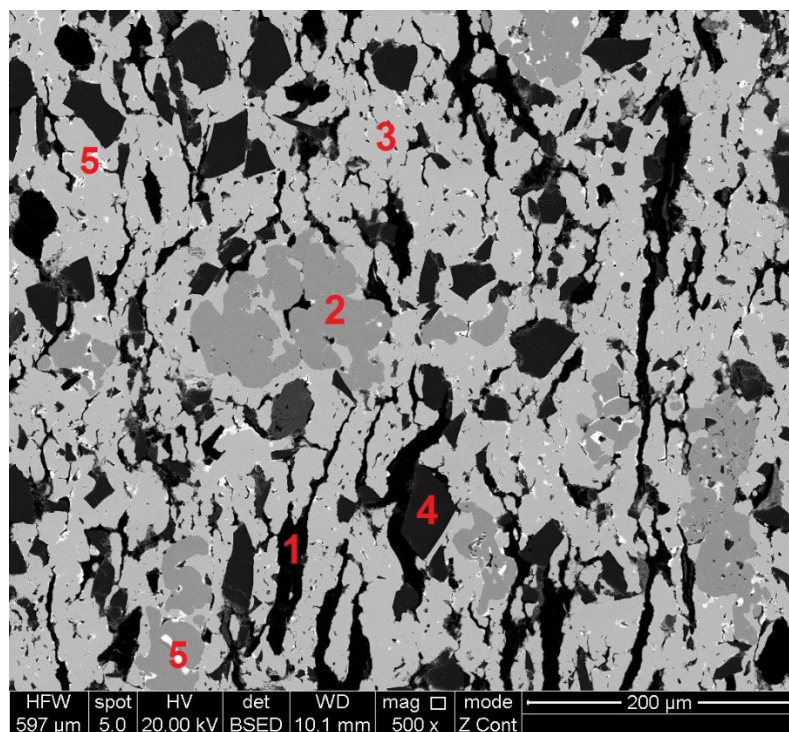
Tab. 8. EDX analýza vzorku B ve stavu po dynamometrických testech.

	C _K	O _K	Al _K	Si _K	Pb _M	Sn _L	Fe _K	Cu _K
	(hm. %)							
Plocha	32,3	6,8	0,4	5,4	6,4	5,1	3,2	40,3
1	9,6	1,6	-	-	9,2	7,7	-	72,0
2	26,5	4,8	-	39,9	4,6	4,6	-	19,7
3	36,5	3,2	0,3	2,2	19,7	8,3	1,7	28,2
4	15,3	2,4	-	-	4,7	8,2	-	69,3
5	71,1	4,0	0,2	0,3	0,9	6,7	7,1	9,7
6	36,8	4,0	-	0,5	8,5	13,3	-	36,9
7	39,9	2,5	-	0,3	10,5	7,3	-	39,6

Tabulka 8 udává složení frikčního povrchu analýzou EDX. Prakticky ve všech místech měření byl zaznamenán významný podíl olova (lokálně až téměř 20 %).

Vzorek B – výbrus

V porovnání se vzorkem A lze na obrázku 40 pozorovat více jemnozrnnou strukturu. EDX analýza výbrusu vzorku B je shrnuta v tabulce 9.



Obr. 40. Výbrus vzorku B s vyznačenými místy EDX analýzy.

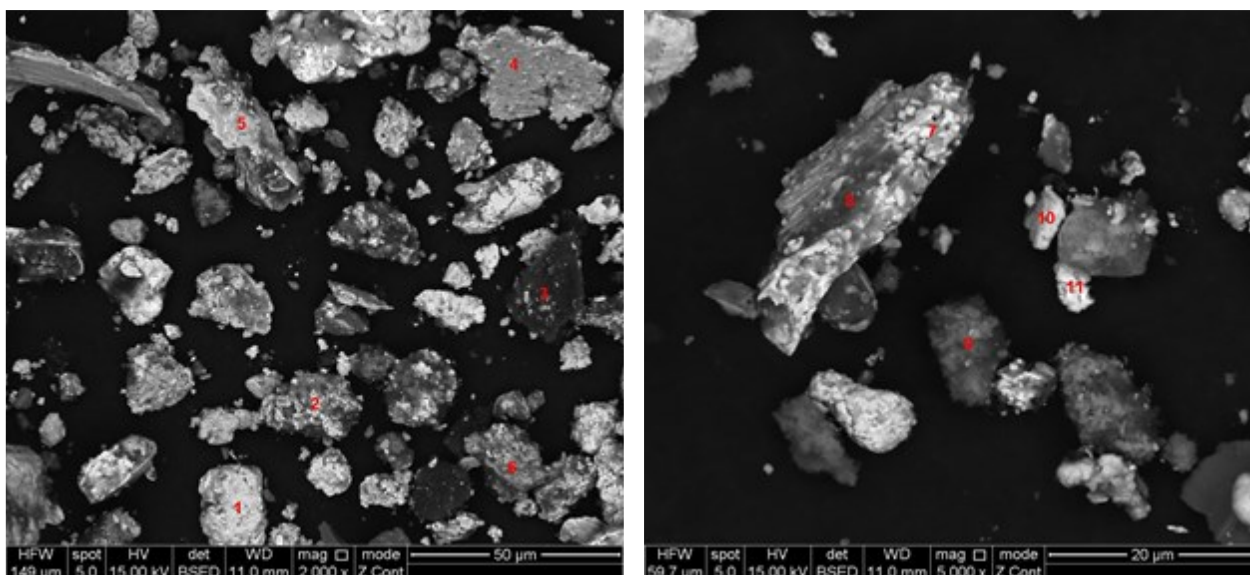
Tab. 9. EDX analýza výbrusu vzorku B.

	C _K	O _K	Al _K	Si _K	Pb _M	Bi _M	Sn _L	Fe _K	Cu _K	K _K	Na _K
	(hm. %)										
Plocha	25,9	7,2	0,3	10,0	2,9	0,1	4,7	3,5	45,2	0,1	0,2
1	88,2	5,5	0,1	0,2	1,3	0,1	0,3	0,2	3,2	0,3	0,7
2	1,4	1,2	0,1	0,2	0,3	0,2	0,3	95,5	0,7	0,1	0,1
3	0,7	0,4	-	0,2	0,2	0,2	9,2	0,3	88,1	0,1	0,7
4	1,0	41,0	0,4	55,4	0,3	-	0,6	0,1	1,1	0,1	-
5	4,4	6,3	0,2	0,5	78,0	3,3	0,3	5,8	1,2	-	-

Plošná analýza odhalila kromě mědi a uhlíku i větší podíl křemíku (10 % hm.). Stanoveny byly následující fáze: grafit, částice Fe, bronzovou matici (Cu-Sn), abrazivní částice SiO₂ a fázi na bázi olova Pb(Fe-Cu-Bi).

Vzorek B – otěrové částice

Otěrové částice vzorku B (obr. 41) dosahují maximálně 50 μm, menších částic je vidět jen málo, nejmenší z nich mají cca. 1 μm.

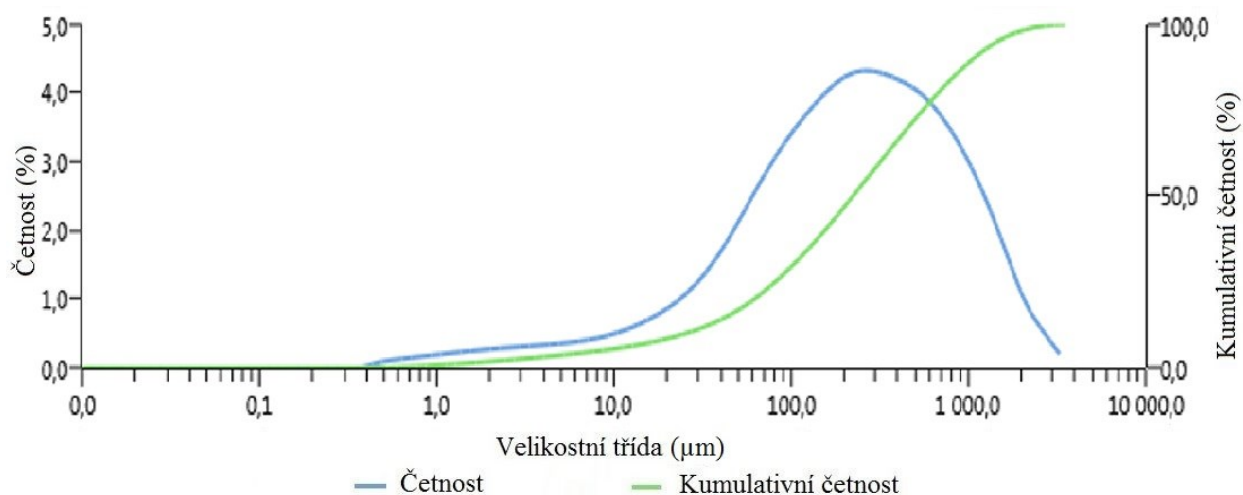


Obr. 41. SEM snímky otěrových částic vzorku B s vyznačenými místy EDX analýzy.

Tab. 10. EDX analýza otěrových částic vzorku B.

	C _K	O _K	Si _K	Pb _M	Sn _L	Ca _K	Fe _K	Cu _K
	(hm. %)							
Plocha	44,4	10,3	2,3	4,0	3,1	-	6,0	29,2
1	9,3	6,4	2,1	5,1	6,2	-	3,5	67,3
2	29,6	5,9	2,7	4,4	5,2	-	10,6	41,0
3	66,8	5,7	1,7	4,8	2,3	-	8,0	10,3
4	17,5	2,6	1,0	1,6	2,4	-	6,3	68,2
5	9,5	2,3	0,7	5,6	6,4	-	2,7	72,2
6	14,6	4,6	3,7	5,1	3,1	-	40,3	28,1
7	10,5	4,2	1,6	5,2	10,8	-	4,1	63,1
8	47,1	5,4	1,1	3,7	6,5	-	2,4	33,3
9	26,4	11,6	1,3	3,5	1,5	45,2	3,0	6,6
10	17,9	6,6	6,8	4,4	4,8	-	7,2	52,0
11	15,9	1,6	2,8	4,6	4,3	-	3,3	67,2

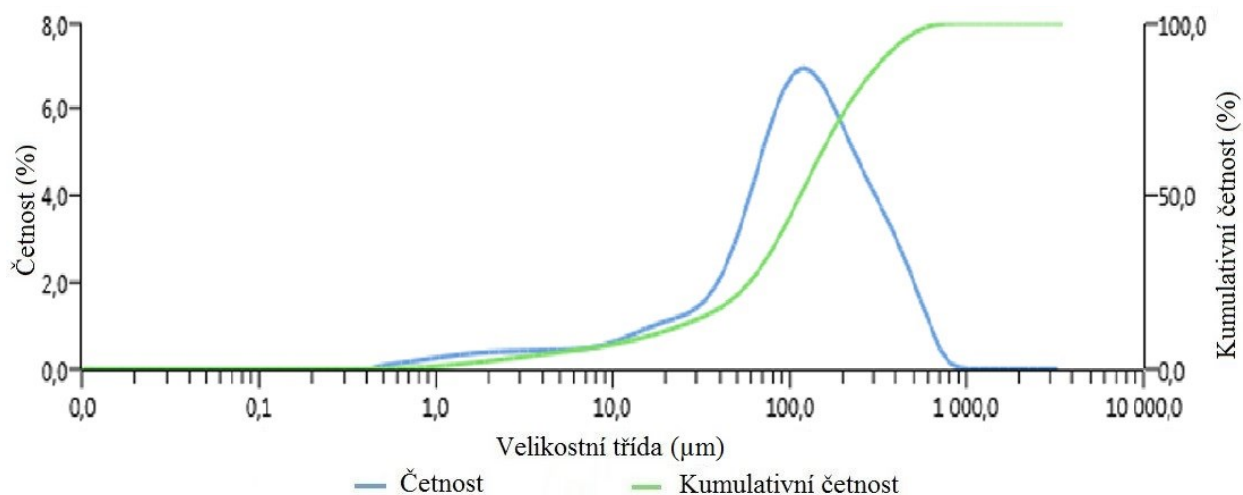
V tabulce 10 je shrnuto následující: komplexní analýza zahrnující různé typy částic, 1) oxid Cu-Fe-Sn-Pb-C (otěr z matrice) + Si-O, 2) částice grafit + Cu-Fe-O + Si-O, 3) částice grafitu, 4) částice grafit + Cu-Fe-O, 5) částice Cu-Fe-Sn-Pb + grafit, 6) částice Cu-Fe-Sn-O + grafit + Si-O, 7) oxid Cu-Fe-Sn-Pb (otěr z matrice) + grafit + Si-O, 8) částice grafit + Cu-Fe-Sn-O, 9) CaO - CaC – nečistota, 10) Cu-Fe-O + Si-O + grafit a 11) Cu-Fe-Sn + grafit.



Obr. 42. Velikostní rozdělení ořetrových částic – vzorek B.

Přibližně 4,5 % částic dosahuje 200 μm , cca. 50 % všech částic se pohybuje v rozmezí 100 až 500 μm , viz obr. 42.

Vzorek C – ořetrové částice

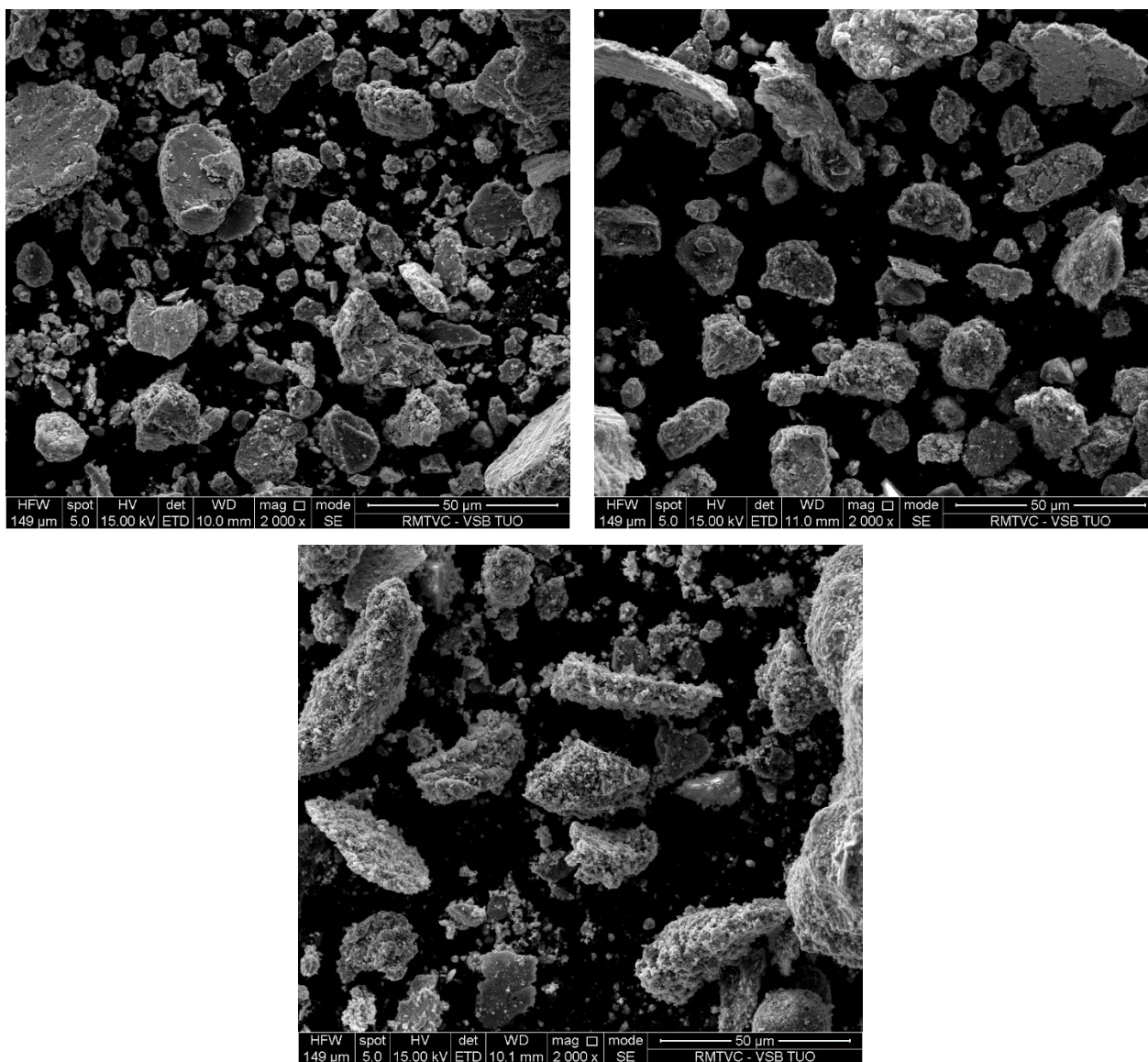


Obr. 43. Velikostní rozdělení ořetrových částic – vzorek C.

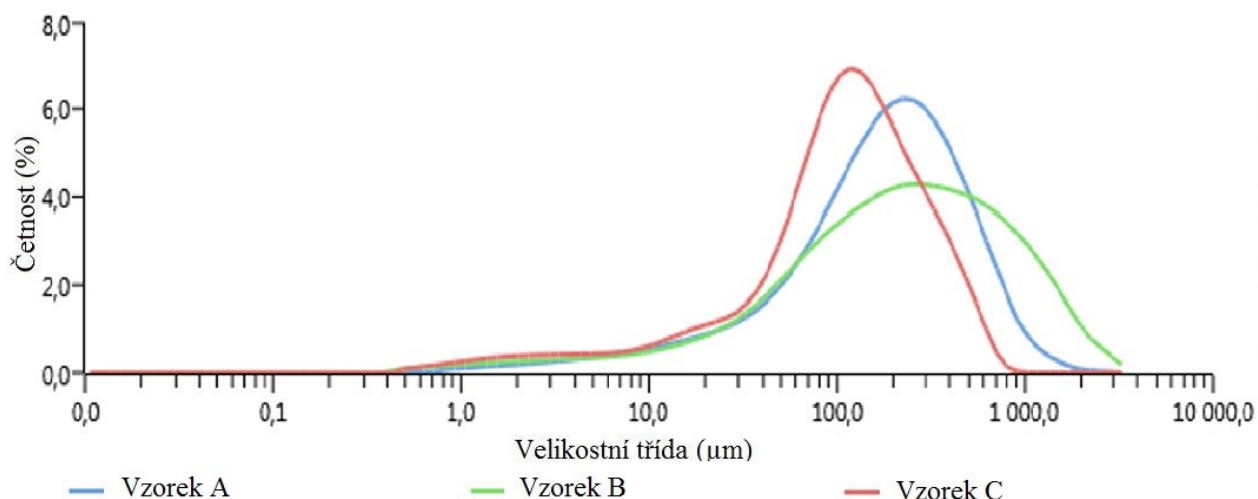
U vzorku C (viz obr. 43) dosahují nejvyšší četnosti (přes 7 %) částice o velikosti 100 μm . Částice větší než 1 mm nebyly detekovány.

Srovnání otěrových částic

Z obrázku 44 je patrné srovnání otěrových částic. Částice organického kompozitu vzorku C mají daleko více nerovný povrch. Graf na obrázku 45 ukazuje, že nejmenší otěrové částice přísluší vzorku C, zatímco průměrně největší částice vznikají při tření vzorku B.



Obr. 44. Srovnání otěrových částic. Nahoře zleva vzorky A a B, dole vzorek C.



Obr. 45. Velikostní rozdělení otěrových částic – srovnání A, B, C.

5.3.3. Analýza XRFS

Analýza byla provedena na energiově disperzním rentgenovém fluorescenčním spektrometru SPECTRO XEPOS new, který se nachází na Centru nanotechnologií VŠB-TUO. Spektrometr je vybaven 50 W Pd rentgenovou lampou chlazenou vzduchem. Detekci signálu zajišťuje detektor Si(Li) s Peltierovým chlazením a rozlišením menším než 160 eV (pro Mn K- α). Měření proběhlo metodou TQ kovy. Analýzy jsou shrnuty v tabulkách 11 a 12.

Vzhledem k tomu, že se pomocí XRFS nedají stanovit prvky lehčí než sodík, nemůžeme touto metodou určit obsah kyslíku a uhlíku. Z tohoto důvodu jsme museli provést normalizaci. Ta spočívala v tom, že jsme vzali součty obsahů O a C z EDX analýzy vzorků ve výchozím stavu (25,8 % hm. pro vzorek A, 45,0 % hm. u vzorku B) a ty jsme z celkového součtu prvků odečetli. Vynásobením výsledků XRFS koeficientem 0,742, respektive 0,550 jsme dosáhli lepší shody mezi EDX a XFRS analýzami. Metodou XRFS analyzujeme daleko větší objem než u EDX. Z toho důvodu je EDX vhodnější pro analýzu frikční vrstvy, zatímco XRFS je vhodnější pro ostatní analýzy.

Tab. 11. Normalizovaná XRFS analýza vzorku A.

	Al	Si	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Sn	Pb
	(hm. %)											
výchozí	14,024	1,766	0,126	0,016	0,002	0,001	-	3,955	49,788	0,039	3,628	0,005
po testech	9,275	2,122	0,111	0,022	0,004	0,010	0,054	12,020	45,707	0,031	3,962	0,001

Majoritně zastoupenými prvky ve vzorku A jsou měď, hliník, železo, cín a křemík. Dále jsou v materiálu stopová množství vápníku, zinku, manganu, titanu, vanadu, chromu a olova. Po dynamometrických testech se na povrchu nachází významně více železa a méně hliníku a mědi. Zvětšení podílu železa lze vysvětlit difuzí a zachycením částic železa z litinového brzdového kotouče.

Tab. 12. Normalizovaná XRFS analýza vzorku B.

	Al	Si	Ca	Ti	Fe	Cu	Zn	As	Zr	Sn	Pb
	(hm. %)										
výchozí	0,990	11,385	0,270	0,012	0,952	34,650	0,025	0,006	0,002	3,702	2,294
po testech	0,446	11,165	0,198	0,009	2,470	34,760	0,023	0,002	0,002	3,597	2,140

Ve vzorku B jsou majoritně zastoupeny tyto prvky: měď, křemík, cín, olovo a železo. Dále je přítomen hliník a vápník, ve stopovém množství pak titan, zinek, arsen a zirkonium. Stejně jako u vzorku A, došlo i v případě vzorku B k nárůstu podílu železa na úkor hliníku, pravděpodobně ze stejného důvodu – zachycení částic z litinového kotouče.

V obou vzorcích je převládajícím prvkem měď, která tvoří téměř 50 % hm. ve vzorku A a necelých 35 % hm. ve vzorku B. Druhým nejčtetnějším prvkem ve vzorku A je hliník se 14 % hm., ve vzorku B je ho cca. 1 % hm. Železa, kterého je ve vzorku A 4 % hm., je ve vzorku B cca. 4x méně. Naproti tomu ve vzorku B je cca. 9x více křemíku než ve vzorku A. Olovo, kterého je ve vzorku A jen stopové množství, tvoří ve vzorku B cca. 2,3 % hmotnosti.

5.3.4. Ramanova spektroskopie

Vzorky byly analyzovány na konfokálním Ramanově mikroskopu XploRA™ (HORIBA Jobin Yvon, Francie). Součástí přístroje je optický mikroskop Olympus BX41/51 s použitím objektivu o zvětšení 50x. Pro měření byl použit laser o vlnové délce 532 nm (20 – 25 mW, třída 3B). Detekce Ramanova záření probíhá na 1024 pixelovém 1“ CCD čipu, který je vysoce citlivý a vzduchem chlazený. Intenzita laseru byla regulována na 1-10% původního laserového záření, dle odezvy v daném místě.

Spektra byla snímána desetkrát po dobu 10 s při nastavení mřížky s 1200 vrypy/mm. Přístroj je plně automaticky ovládán pomocí počítačového softwaru LabSpec, ve kterém byly

prováděny i veškeré úpravy spekter (bylo srovnáno pozadí, označeny pozice pásů a upraven šum spekter). Každý vzorek byl proměřen v minimálně 50 různých bodech.

Následující tabulka (tab. 13) shrnuje detekované sloučeniny, které byly vyhodnoceny dle nejlepší shody s knihovnou Ramanových spekter, která je součástí přístroje. V některých případech (označeno *) se jedná pravděpodobně o tuto sloučeninu, či jí podobnou, jelikož nebyla nalezena úplně přesná shoda. Jako majoritní se ve většině bodů ukázal amorfni uhlík, následně pak grafit, zbylé detekované sloučeniny byly zaznamenány minoritně.

Tab. 13. Výsledky analýzy Ramanovou spektroskopií.

Vzorek A výchozí	Amorfni uhlík, grafit, křemičitany (blíže neurčené)*
Vzorek A po testech	Amorfni uhlík, grafit, Fe_3O_4 , CuO
Vzorek B výchozí	Amorfni uhlík, grafit, SiO_2 , Pb_3O_4 *
Vzorek B po testech	Amorfni uhlík, grafit, SiO_2 , CuO , $\gamma\text{-PbO}$

5.3.5. Zhodnocení analýz

Z provedených analýz vyplývá, že struktura vzorku B je více jemnozrnná než u vzorku A, jak lze vidět na snímcích z optického i elektronového mikroskopu. Na SEM snímcích vzorku A můžeme pozorovat houbovitou strukturu. Plošnou EDX analýzou bylo stanoveno složení vzorku, ačkoli EDX analýza zpravidla nadhodnocuje obsah uhlíku. Dále byly stanoveny fáze vyskytující se na povrchu vzorku. V případě vzorku A se jednalo o bronzovou matici, částice železa, částice grafitu, užitého jako maziva a abrazivní částice syntetického mullitu.

Zkoumání vzorku A po dynamometrických testech ukázalo značně nehomogenní strukturu frikčního povrchu s velkým množstvím zachycených otěrových částic. EDX analýza prokázala vznik oxidických fází (Fe, Sn). Zvýšený podíl Fe na povrchu po testech lze vysvětlit zachycením materiálu z brzdového kotouče. Analýza výbrusu vzorku A naznačuje menší podíl mědi v objemu. Otěrové částice sestávají z částic oxidických, komplexních a grafitických. Nejčtenější jsou částice o velikosti cca. 200 μm , největší pak mají 2 mm.

V případě vzorku B můžeme pozorovat strukturu, kde jsou póry vyplněny olovem, které během slinování přešlo do kapalné fáze. Ve vzorku A se dle EDX nacházelo olovo v množství menším než 1 % hm., ve vzorku B je to téměř 5 % hm. Stejně jako u vzorku A bylo plošnou EDX

analýzou stanoveno složení vzorku B. Následně byly stanoveny tyto fáze: bronz (matrice), grafit a Pb jako maziva, a také abrazivní částice SiO_2/SiC .

Obdobně jako u vzorku A byla struktura povrchu vzorku B po dynamometrickém testování značně nehomogenní a s velkým množstvím zachycených otěrových částic. Objemová analýza výbrusu dokládá strukturu, která je jemnější než u vzorku A. Složení v objemu je velmi podobné složení na povrchu. Studovaný otěrový materiál vzorku B sestával z různých oxidických, grafitických a směsných částic. Rozdělení velikosti částic bylo v případě vzorku B rovnoměrnější, nejčastěji měly částice okolo 200 μm , největší částice dosahovaly 3 mm.

Ve srovnání se vzorky A a B jsou otěrové částice vzorku C menší, nejčastěji cca. 100 μm . Největší částice pak nepřesahují 1 mm. Nejmenší otěrové částice tedy měl vzorek C, průměrně největší pak vzorek B. Z hlediska účinků na lidské zdraví a na životní prostředí obecně je lepší, když vznikají částice větší.

Analýzy pomocí XRFS byly u obou vzorků poněkud odlišně od analýz EDX, provedli jsme proto výše popsanou normalizaci. Obecně je XRFS přesnější metodou pro stanovení kvantitativní analýzy. V našem případě ale nebylo známo přesné složení z důvodu ochrany výrobního know-how, a také nebyly dostupné standardy o známém složení pro tento typ kompozitních materiálů. Měření pomocí XRFS je totiž závislé právě na kalibraci pomocí standardů o známém složení. V tomto případě byla kalibrace provedena podle nejlepšího kvalifikovaného odhadu na kovové materiály, ač vzorek obsahoval významné množství nekovů.

Obsah mědi, jakožto součásti bronzové matrice, byl pomocí XRFS u vzorku A stanoven v rozmezí 45 až 50 % hm., u vzorku B pak cca. 35 % hm. Obsah abraziv (součet Al a Si) byl v obou případech 15 až 20 % hm., což je více, než bylo stanoveno pomocí EDX. Obsah olova byl menší než z EDX, tedy stopové množství u vzorku A a cca. 2,2 % hm. ve vzorku B. Rozdíl ve stanoveném složení je u obou vzorků před testováním a po něm jen malý. To je způsobeno velkým interakčním objemem u XRFS, který je obtížněji použitelný pro studium povrchu.

Ramanovou spektroskopií byly stanoveny majoritně zastoupené fáze na povrchu vzorků. Některé fáze se nepodařilo z databáze identifikovat přesně, byly tedy uvedeny nejbližší odpovídající fáze. Majoritně se vyskytoval grafit a amorfni uhlík, minoritně pak oxidy zastoupených kovů a křemíku.

Závěr

Cílem této práce bylo stanovení frikční účinnosti, provedení analýzy frikčního povrchu kovo-keramických brzdových desek a srovnání jejich vlastností. Zkoumány byly vzorky A, B a C. Vzorky A a B představovaly kovo-keramické desky, vzorek C byl běžně komerčně dostupný typ brzdové desky určené pro osobní automobily. Tento vzorek byl zařazen pro srovnání frikční účinnosti, opotřebení a vznikajících otěrových částic.

Frikční účinnost byla testována na brzdovém dynamometru dle normy ISO 26867. Z provedených testů vyplývá, že vzorek A dosahuje frikční účinnosti ($\mu = 0,42$) vzorku C ($\mu = 0,45$). Vzorek B má frikční účinnost daleko horší ($\mu = 0,23$). Tato horší účinnost byla způsobena značným tepelným (i tlakovým) namáháním, které mělo za následek nalepení většího množství materiálu frikční vrstvy na brzdový kotouč.

Opotřebení je v této práci odhadováno sice z poměrně malého počtu brzdných cyklů, při testech však bylo tepelné i mechanické namáhání desek poměrně velké. Lze proto soudit, že došlo k degradaci materiálu a data jsou relevantní. Ke znatelnému opotřebení desek došlo jak u vzorku B, tak i C. Jak bylo řečeno, mnoho materiálu desek vzorku B se zachytilo na kotouči. V případě vzorku C došlo zřejmě k degradaci a odpaření fenolické pryskyřice při teplotě přesahující 600 °C. Naproti tomu frikční vrstva vzorku A byla možná až příliš stabilní a větší opotřebení by bylo žádoucí, aby docházelo k obnově materiálu a tím i vlastností frikční vrstvy.

Analýzy byly provedeny před i po dynamometrickém testování. Snímky z optického i elektronového mikroskopu dokládají, že vzorek B má více jemnozrnnou strukturu než vzorek A.

Prvkovou analýzou EDX bylo stanoveno složení vzorků. V obou případech (A i B) byla potvrzena matrice tvořená bronzem Cu-Sn, grafit coby mazivo a částice železa. Vzorek B navíc obsahoval i významný podíl olova, které také slouží jako mazivo. Ve vzorku A byl abrazivem syntetický mullit (Al-Si-O), u vzorku B byla použita abraziva na bázi křemíku (SiO_2/SiC).

Analýza velikosti otěrových částic dokládá, že nejmenší částice vznikaly otěrem vzorku C, největší u vzorku B. Větší částice jsou lepší z hlediska zdravotních rizik a životního prostředí. U analýzy pomocí XRFS byla provedena normalizace, aby nastala lepší shoda s analýzou EDX. Ramanovou spektroskopií byly stanoveny majoritně zastoupené fáze.

Literární zdroje

[1] FIALA, Jaroslav a Ivo KRAUS. *Povrchy a rozhraní*. 2. přepracované vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016. ISBN 978-80-01-05881-7.

[2] TOMÁŠEK, Vladimír. *Frikční kompozity pro brzdové systémy automobilů a metody jejich charakterizace*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2009. ISBN 978-80-248-2085-9.

[3] SKOTNICOVÁ, Kateřina. *Prášková metalurgie: studijní opory: učební text, scénáře, testy*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3378-1.

[4] COX, Roy L. *Engineered tribological composites: the art of friction material development*. Warrendale, Pa.: SAE International, c2012. ISBN 978-0-7680-3485-1.

[5] BUCKLEY, Donald H. *Surface effects in adhesion, friction, wear, and lubrication*. New York: Distributors for the US and Canada, Elsevier North-Holland, 1981. ISBN 978-0-444-41966-8.

[6] RHEE, S. K. a R. T. DUCHARME. *The friction surface of gray cast iron brake rotors*. *Wear* [online]. 1973, **23** (2), 271-273 [cit. 2017-04-19]. DOI: 10.1016/0043-1648(73)90092-6. ISSN 00431648. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0043164873900926>

[7] MARKEL, Andrew. *Analyzing Brake Friction Material* [online]. [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: <http://www.tomorrowstechnician.com/analyzing-brake-friction-material/>

[8] IORDANOFF, Ivan a Yves BERTHIER. *First steps for a rheological model for the solid third body* [online]. s. 551 [cit. 2017-04-19]. DOI: 10.1016/S0167-8922(99)80075-3. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167892299800753>

[9] CHAN, D a G. W. STACHOWIAK. *Review of automotive brake friction materials. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* [online]. 2004-1-1, **218** (9), 953-966 [cit. 2017-04-19]. DOI: 10.1243/0954407041856773. ISSN 0954-4070. Dostupné z: <http://sdj.sagepub.com/lookup/10.1243/0954407041856773>

[10] SCHATT Werner, Klaus-Peter WIETERS a Bernd KIEBACK. *Pulvermetallurgie Technologien und Werkstoffe*. 2., bearbeitete und erw. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer, 2007. ISBN 9783540236528.

[11] DOWSON, Duncan. *History of Tribology*. 2nd ed. London: Professional Engineering Publishing, 1998. ISBN 1-86058-070-x.

- [12] GIBSON, H. B. *Engineering Design Handbook: Analysis and Design of Automotive Brake Systems*. United States. Army Materiel Command: Army Materiel Development and Readiness Command, 1976.
Dostupné z: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a035143.pdf>
- [13] What is brake fade? *Ebcbrakes.com* [online]. 2013 [cit. 2017-04-19].
Dostupné z: <http://ebcbrakes.com/articles/what-is-brake-fade/>
- [14] Brake Pads. *Suscon.org*/ [online]. Akebono, 2007 [cit. 2017-04-19].
Dostupné z: <http://www.suscon.org/pdfs/bpp/pdfs/OEBrakePads.pdf>
- [15] Friction by Material Code. *Protecfriction.com* [online]. 2013 [cit. 2017-04-19].
Dostupné z: <http://protecfriction.com/frictionmaterialcode.html>
- [16] DE GROOTE, Steven. Brake system. *Mechanics* [online]. 2008 [cit. 2017-04-19].
Dostupné z: <http://www.fltechnical.net/articles/2>
- [17] JANG, Ho a Seong Jin KIM. *The effects of antimony trisulfide (Sb_2S_3) and zirconium silicate ($ZrSiO_4$) in the automotive brake friction material on friction characteristics*. *Wear* [online]. 2000, **239** (2), 229-236 [cit. 2017-04-19]. DOI: 10.1016/S0043-1648(00)00314-8. ISSN 00431648. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164800003148>
- [18] NAKAJIMA, O. a T. KUDO. *Friction materials*. 2000. USA. US Pat. 6107386 (United States Patent and Trademark Office).
- [19] KESAVAN, S. a G. BURMESTER. *Metal titanates for friction stabilization of friction materials*. USA. US Pat. 5891933 (United States Patent and Trademark Office).
- [20] High Temperature Pin On Disc Tribometer. *Frictionnwear.com* [online]. [cit. 2017-04-19].
Dostupné z: <http://www.frictionnwear.com/products/pin-on-disc-test-mc>
- [21] KRÍŽ, Antonín. *Tribologická analýza Pin-on-Disc*. In: *Metal 2004*. Ostrava: Tanger, 2004, s. 8. ISBN 80-85988-95-X.
- [22] Centric Friction Development Lab. *Stoptech.com* [online]. [cit. 2017-04-19].
Dostupné z: <http://www.stoptech.com/technical-support/technical-white-papers/centric-friction-development-lab>
- [23] FAST Dry Friction Test Stand. *Directindustry.com* [online]. [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://pdf.directindustry.com/pdf/link-engineering/fast-dry-friction-test-stand/30769-165911.html>
- [24] KRAUSS Test & Training Center Freiberg. *Kraussgmbh.de* [online]. [cit. 2017-04-19].
Dostupné z: <http://www.kraussgmbh.de/forum/viewtopic.php?t=558>
- [25] History - Greening Inc. *Greeninginc.com* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://greeninginc.com/our-company/history/>

- [26] ISO 26867:2009. *Road vehicles -- Brake lining friction materials -- Friction behaviour assessment for automotive brake systems*. International Organization for Standardization, 2009. Dostupné také z: www.iso.org/standard/43848.html
- [27] SAE J2522. *Dynamometer Global Brake Effectiveness*. SAE International, 18 s. Dostupné také z: http://standards.sae.org/j2522_200306/
- [28] SAE J2707. *Wear Test Procedure on Inertia Dynamometer for Brake Friction Materials*. SAE International, 12 s. Dostupné také z: http://standards.sae.org/j2707_201210/
- [29] CAIS, J. *Elektronová mikroskopie. Metalografie: Metodická příručka*. Praha: Centrum pro studium vysokého školství, 2015. ISBN 978-80-86302-67-6. Dostupné také z: http://www.csvs.cz/projekty/2014_veda_pro_zivot/data/11_KA3_Jaromir_Cais_2_Elektronova_%20mikroskopie_a_%20EDS_%20analyza_metodicka_prirucka.pdf
- [30] OTRUBA, Vítězslav. *Elektronová mikroanalýza* [online]. Brno, 2011 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: http://is.muni.cz/el/1431/podzim2013/C7031/um/15_AS_Elektronova_mikroanalyza.pdf?lang=cs
- [31] Raman Spectroscopy: An introduction to Raman Spectroscopy. *Andor.com: an Oxford Instruments company* [online]. [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://www.andor.com/learning-academy/raman-spectroscopy-an-introduction-to-raman-spectroscopy>